



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI UDINE

DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE
E AMBIENTALI

Via delle Scienze 208 - 33100 Udine - tel.0432/558601 - fax 558603

Ali.For.MiDI

Sperimentazione di metodi innovativi di analisi di dati LiDAR per l'individuazione della struttura del bosco, delle tipologie forestali, del carbonio stoccato e della mitigazione del dissesto idrogeologico

- RELAZIONE FINALE -

Coordinamento scientifico: Prof. Pierluigi Bonfanti
Prof. Federico Cazorzi

Rilievi a terra ed elaborazioni: Dr. Giorgio Alberti
Dr. Cristina Bertacco
Dr. Giacomo Blasone
Dr. Francesco Boscutti
Dr. Giuseppe de Simon
Dr. Maurizia Sigura

Elaborazioni dati LiDAR: E-Laser s.r.l., Udine

Settembre 2011

INDICE

1. INTRODUZIONE, OBIETTIVI E PRODOTTI DELLA RICERCA	8
2. MATERIALI E METODI	10
2.1 Area di studio	10
2.1.1 Inquadramento territoriale.....	10
2.1.2 Aspetti geologici e pedologici.....	11
2.1.3 Aspetti climatici	12
2.1.4 La vegetazione forestale.....	15
2.1.5 Dati dendrometrico-asestamentali	16
2.1.6 Strumenti di tutela	23
2.2 Rilievo laser e carta della struttura forestale	25
2.2.1 Acquisizione e processamento dei dati LiDAR	25
2.2.2 Pre-processamento dei dati laser	26
2.2.3 Estrazione e parametrizzazione morfometrica dei singoli alberi	26
2.2.4 Realizzazione della carta della struttura forestale	26
2.3 Schema di campionamento e rilievi in campo	28
2.3.1 Metodologia di campionamento.....	28
2.3.2 Rilievi in campo: estrazione del campione	28
2.3.3 Stimatori campionari.....	29
2.3.4 Frazione di unità campionarie in ciascuno strato.....	30
2.3.5 Numerosità del campione.....	30
2.3.6 Estrazione delle unità campionarie	31
2.4 Rilievi forestali e relative elaborazioni	31
2.5 Rilievi vegetazionali e relative elaborazioni	35
2.6 Analisi della fragilità territoriale.....	37
2.6.1 Metodologia di analisi.....	37
2.6.2 Analisi applicata all'area di studio.....	38
3. RISULTATI E DISCUSSIONE	42
3.1 Validazione della carta delle aree boscate e non boscate derivata da dati LiDAR	42
3.2 Validazione della carta conifere-latifoglie derivata da dati LiDAR	42
3.3 Validazione della carta della struttura derivata da dati LiDAR	44
3.4 Stima della provvigione e degli stock di carbonio da dati LiDAR	52
3.5 Analisi vegetazionale	63
3.5.1 Carta e caratterizzazione vegetazionale	63
3.5.1.1 Consorzi forestali misti a <i>Fagus sylvatica</i> e <i>Picea abies</i> dell' <i>Anemone trifoliae</i> - <i>Fagetum</i>	63
3.5.1.2 Mosaico di arbusteti alpini e perticaie a <i>Pinus mugo</i>	66
3.5.2 Biodiversità e struttura	73
3.6 Contributo per l'identificazione di aree forestali ad elevato valore naturalistico	76
3.7 Mappatura della fragilità territoriale	78
4. CONCLUSIONI	81
BIBLIOGRAFIA	83

INDICE DELLE FIGURE E DELLE TABELLE

FIGURE:

Figura 1: localizzazione dell'area di studio a livello regionale (figura in alto) e comunale.....	10
Figura 2: carta litologica (RAFVG, 2006).....	12
Figura 3: linee segnalatrici di possibilità pluviometrica calcolate per ogni punto considerato	15
Figura 4: area di studio con le particelle forestali del piano di gestione della Proprietà Regionale di Fusine in Valromana con indicazione delle principali tipologie forestali presenti (RAFVG, 2006).	22
Figura 5: aree naturali tutelate (RAFVG)	23
Figura 6: zone vincolate (RAFVG).....	24
Figura 7: diagramma di flusso descrittivo di <i>Fragile!</i> (da Cazorzi et al., 2009).	38
Figura 8: modello digitale del terreno (DTM) alla risoluzione di 1 m ottenuto da dati LiDAR (a) e alla risoluzione di 40 m utilizzato nello studio del 2008 (b).....	39
Figura 9: carta di Uso del suolo ricavata dall'analisi dei dati LiDAR (a) e Uso del suolo derivato dalla Carta Natura APAT (b).	40
Figura 10: curve ipsometriche (in rosso) derivate dai dati misurati nelle 37 aree di saggio per le quattro specie principali (<i>Picea abies</i> , <i>Fagus sylvatica</i> , <i>Larix decidua</i> e <i>Abies alba</i>). Le linee blu tratteggiate indicano gli intervalli di confidenza al 95%. Le equazioni e le statistiche per ciascuna specie sono riportate nel relativo riquadro.....	46
Figura 11: confronto tra altezza media derivata da dati LiDAR ed altezza media di Lorey per l'intero popolamento (piante con $d > 4.5$ cm). La linea rossa indica la regressione la cui equazione è riportata in figura. L'intercetta non è significativamente diversa da zero ($p=0.90$). Le linee blu tratteggiate indicano gli intervalli di confidenza al 95%.	47
Figura 12: confronto tra altezza media derivata da dati LiDAR ed altezza media di Lorey per le sole piante con $d > 12.5$ cm. La linea rossa indica la regressione la cui equazione è riportata in figura. L'intercetta non è significativamente diversa da zero ($p=0.16$). Le linee blu tratteggiate indicano gli intervalli di confidenza al 95%.	48
Figura 13: confronto tra densità del popolamento derivata da dati LiDAR ed densità del popolamento rilevata a terra per le sole fustaie adulte o mature e per le piante con $d > 12.5$ cm. La linea rossa indica la regressione la cui equazione è riportata in figura. Le linee blu tratteggiate indicano gli intervalli di confidenza al 95%.	48
Figura 14: distribuzione delle piante in classi di altezza per le diverse categorie strutturali (novelletto, spessina, perticaia, fustaia adulta, fustaia matura e multiplano). Sono stati considerati solo i 25 punti sui 37 campionati per i quali la classificazione a terra coincide con quella del LiDAR. Nella categoria multiplano sono stati inclusi anche i punti classificati dal LiDAR come biplano. Le barre orizzontali indicano l'errore standard della media. Gli asterischi indicano una differenza significativa ($P < 0.001$) tra rilievo LiDAR e rilievo a terra per una classe di altezza.	51

Figura 15: distribuzione delle piante in classi di altezza per punti per i quali la classificazione in campo (grigio) non corrispondeva con quella del LiDAR (nero). Le barre indicano l'errore standard della media.	52
Figura 16: confronto tra le curve ipsometriche reali e le curve ipsometriche delle tariffe di cubatura prescelte per il calcolo del volume per le quattro specie principali dell'area di studio (<i>Picea abies</i> , <i>Fagus sylvatica</i> , <i>Larix decidua</i> e <i>Abies alba</i>).	53
Figura 17: calibrazione in 19 punti estratti a caso tra quelli campionati del modello per la stima del volume totale unitario utilizzando l'altezza media derivata da dati LiDAR (a sinistra) e validazione del modello sui 18 punti rimanenti. Le linee tratteggiate blu rappresentano gli intervalli di confidenza al 95%.	55
Figura 18: calibrazione in 19 punti estratti a caso tra quelli campionati del modello per la stima del volume delle piante con diametro maggiore di 12.5 cm utilizzando l'altezza media derivata da dati LiDAR (a sinistra) e validazione del modello sui 18 punti rimanenti. Le linee tratteggiate blu rappresentano gli intervalli di confidenza al 95%.	55
Figura 19: confronto tra provvigione totale unitaria (piante > 4.5 cm) per categoria strutturale derivata da dati LiDAR e misurata in campo. Le barre indicano l'errore standard della media.	56
Figura 20: distribuzione della provvigione unitaria ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$) delle piante con $d > 12.5$ cm nelle categorie forestali e nelle categorie strutturali all'interno dell'area di studio (sono state escluse le mughete).	59
Figura 21: calibrazione in 19 punti estratti a caso tra quelli campionati del modello per la stima dello stock di carbonio totale unitario utilizzando l'altezza media derivata da dati LiDAR (a sinistra) e validazione del modello sui 18 punti rimanenti. Le linee tratteggiate blu rappresentano gli intervalli di confidenza al 95%.	60
Figura 22: stock medio ad ettaro di carbonio epigeo per categoria forestale e tipo strutturale nell'area di studio.	61
Figura 23: dendrogramma dei rilievi, Similarity ratio - metodo di Ward.	64
Figura 24: ricchezza floristica e indice di Shannon per le strutture LiDAR, gruppi distinti per $P < 0.05$. Le barre verticali indicano l'errore standard della media.	73
Figura 25: Ricchezza floristica e indice di Shannon per le strutture LiDAR, strato erbaceo ed arbustivo, gruppi distinti per $P < 0.05$. Le barre verticali indicano l'errore standard della media.	74
Figura 26: spettro biologico della florula totale. Ch - Camefite; G - Geofite; H - Emicriptofite; T - Terofite; P - Fanerofite (incluse nano fanerofite).	75
Figura 27: carta del Fattore Regimante della Vegetazione, basata sull'attuale elaborazione dei dati LiDAR (a) e relativa allo studio a scala regionale del 2008 (b).	78
Figura 28: carta del Fattore Stabilizzante della Vegetazione, basata sull'attuale elaborazione dei dati LiDAR (a) e relativa allo studio a scala regionale del 2008 (b).	79
Figura 29: dettaglio delle carte del Fattore Stabilizzante della Vegetazione riportate in Figura 28.	80

Figura 30: carta del Fattore Protettivo della Vegetazione, basata sull'attuale elaborazione dei dati LiDAR (a) e relativa allo studio a scala regionale del 2008 (b).	80
---	----

TABELLE:

Tabella 1: superfici di uso del suolo e percentuale rispetto all'area di studio (Moland Land Use)...	11
Tabella 2: valori di altezza massima delle precipitazioni orarie attese in funzione della durata e del tempo di ritorno.....	14
Tabella 3: estensione delle categorie e dei tipi forestali nell'area di studio (banca dati dei Tipi forestali del Friuli Venezia Giulia, 1997-1999).....	16
Tabella 4: descrizione delle particelle forestali della Foresta Regionale di Fusine e Val Romana ricadenti all'interno dell'area di studio. Produzione classe A: dominanza di suoli profondi ed evoluti rientranti nella categoria dei suoli mesici cui corrisponde una dominanza degli abieti-piceo-faggeti dei suoli mesici e dei pieceo-faggeti della serie silicatica. È la classe culturale maggiormente produttiva; produzione classe B: suoli su substrati carbonatici cui corrispondono piceo-faggeti della serie carbonatica talora con abete bianco o larice. Fertilità 5, 6, eccezionalmente 7.	17
Tabella 5: superfici delle aree naturali tutelate che interessano l'area di studio.....	23
Tabella 6: caratteristiche del volo LiDAR	25
Tabella 7: classi e sottoclassi strutturali come definite da Del Favero et al. (2000) e sottoclassi strutturali (Barilotti, 2009)	27
Tabella 8: sorgente di variazione e stimatori (devianza e varianza)	29
Tabella 9: numero di unità campionarie estratte in modo casuale per ogni tipologia di struttura forestale.....	31
Tabella 10: classi di vitalità definite dall'INFC.....	32
Tabella 11: valori dei coefficienti a e b dell'equazione 1 in funzione delle dimensioni diametriche delle piante (da Anfodillo et al., 2006, modificato)	34
Tabella 12: classi di decadimento del legno	35
Tabella 13: scala delle classi di copertura utilizzate ed intervalli percentuali	36
Tabella 14: valori di CN per l'area di studio.	41
Tabella 15: fattori di Efficacia (EF) dell'effetto stabilizzante della vegetazione utilizzati in <i>Fragile!</i>	41
Tabella 16: tabella di contingenza e calcolo del coefficiente K-Cohen per la validazione della bosco non bosco.	42
Tabella 17: soglie per la classificazione dei soprassuoli in conifere, latifoglie e misto	42
Tabella 18: tabella di contingenza e calcolo del coefficiente K-Cohen per la validazione della carta delle categorie tipologiche (bosco di conifere; bosco di latifoglie; bosco misto). Per la	

classificazione dei soprassuoli a terra sono state considerate tutte le piante con diametro maggiore di 4.5 cm.....	43
Tabella 19: distribuzione dei punti rilevati a terra nelle diverse categorie strutturali e tipologiche. Per la classificazione dei soprassuoli a terra sono state considerate tutte le piante con diametro maggiore di 4.5 cm.....	44
Tabella 20: distribuzione delle superfici per tipo strutturale come individuati nella carta della strutture derivata da dati LiDAR.....	44
Tabella 21: principali caratteristiche dendrometriche delle area di saggio realizzate a terra per categoria strutturale (media \pm errore standard). G: area basimetrica; H_{Lorey} : altezza media di Lorey riferita all'intero popolamento; H_d : altezza dominante; S: statura.	45
Tabella 22: tabella di contingenza e calcolo del coefficiente K-Cohen per la validazione della carta della struttura.....	49
Tabella 23: provvigione totale unitaria e per le piante con diametro maggiore a 12.5 cm per categoria strutturale rilevata a terra. Media \pm errore standard.	54
Tabella 24: superficie, provvigione totale e provvigione totale unitaria per categoria strutturale considerando tutte le piante o solo quelle con diametro maggiore di 4.5 cm (esclusi arbusteti).....	56
Tabella 25: superficie, provvigione totale e provvigione unitaria per categoria e tipo forestale (escluse le mughete e gli arbusteti in generale) come derivata incrociando le informazioni contenute nella carta della struttura e nella carta dei tipi forestali del FVG.	57
Tabella 26: distribuzione della provvigione unitaria ($m^3 ha^{-1}$) delle piante con $d > 12.5$ cm nelle categorie forestali e nelle categorie strutturali all'interno dell'area di studio (sono state escluse le mughete).....	58
Tabella 27: stock di carbonio epigeo per l'intero popolamento e per le piante con diametro maggiore a 12.5 cm per categoria strutturale rilevata a terra. Media \pm errore standard.	59
Tabella 28: stock di carbonio totale ed unitario (tutte le piante, esclusi arbusteti) per categoria e tipo strutturale derivato da dati LiDAR.....	60
Tabella 29: stock medio ad ettaro di carbonio epigeo per categoria e tipo forestale nell'area di studio.....	61
Tabella 30: ripartizione delle categorie strutturali nelle tipologie vegetazionali individuate.....	65
Tabella 31: collocazione dei rilievi nella classificazione LIDAR di boschi a conifere, latifoglie e misti e corrispondenti tipologie vegetazionali individuate	66
Tabella 32: tabella sintetica delle cenosi rilevate. Nella tabella sono riportate le percentuali di frequenza delle singole specie nei quattro gruppi individuati e valori di coperture (minimo, moda e massimo). In tabella non sono riportate le specie sporadiche con una frequenza complessiva inferiore al 5 %. Le attribuzioni fitosociologiche seguono Marinček et al., (1989), Poldini & Nardini (1993) e Oberdorfer (2001).....	72

Tabella 33: spettro biologico delle strutture forestali rilevate, valori riassuntivi dei tre starti vegetazionali indagati. Ch - Camefite; G - Geofite; H - Emicriptofite; T - Terofite; P - Fanerofite (incluse nano fanerofite).	75
--	----

1. INTRODUZIONE, OBIETTIVI E PRODOTTI DELLA RICERCA

Nell'ultimo decennio le scienze ambientali applicate hanno subito un radicale cambiamento grazie alla comparsa di nuove tecnologie relative al reperimento e al trattamento dei dati territoriali. Anche il settore forestale ha tratto benefici da tali innovazioni, soprattutto nella pianificazione. Infatti, la gestione informatizzata dei dati territoriali (raster o vettoriali), quali ortofoto, carte tecniche, mappe tematiche e banche dati, ha permesso di mettere a punto varie applicazioni (interrogazioni, visualizzazioni, report, ecc.) che rendono sufficientemente semplici quesiti di natura territoriale, la cui risposta, solo alcuni anni fa, necessitava di tempi lunghi, generando talvolta consistenti semplificazioni. Grazie a queste nuove tecnologie vi è stato un notevole miglioramento nella percezione e nell'analisi dell'ambiente da pianificare, aspetto che ha permesso un salto di qualità negli elaborati tecnici di supporto alle scelte pianificatorie e gestionali (Abramo et al., 2007).

Un ulteriore salto in avanti nelle tecnologie di rilievo a distanza del territorio si è verificato poi negli ultimi 10-15 anni allorché si è assistito alla comparsa, dapprima nell'ambito della ricerca e successivamente in modo consistente nel settore applicativo, della tecnologia laser scanning da aeromobile. Si tratta di un sistema attivo di rilievo del territorio installato su di un vettore aereo le cui principali caratteristiche tecnologiche sono le seguenti: un telemetro laser (che emette gli impulsi luminosi e registra la risposta degli oggetti colpiti), un sensore GPS ed un apparato IMU (Inertial Measuring Unit).

Mentre le operazioni di filtraggio possono ormai essere considerate procedura consolidata (Barilotti et al., 2006), i metodi per l'estrazione delle variabili ambientali e forestali di interesse dalla nuvola di punti laser necessitano, data la complessità intrinseca degli ecosistemi, di una più dettagliata ed articolata fase di sperimentazione e verifica. Tale sistema di rilievo rappresenta in ogni caso una delle più promettenti tecnologie per la stima delle proprietà biofisiche degli ecosistemi forestali (Holmgren et al., 2003; Naesset, 2002; Nilsson, 1996) e per la caratterizzazione degli elementi strutturali della copertura forestale nelle tre dimensioni (Barilotti et al., 2008).

Sebbene siano già disponibili metodi per la caratterizzazione biometrica e strutturale dei boschi maturi di conifere e latifoglie della Regione Friuli Venezia Giulia (Barilotti et al., 2007; Abramo et al., 2007), l'individuazione e la caratterizzazione delle foreste giovani, miste e/o disetanee a gruppi o per piede d'albero necessita, a causa del maggiore grado di complessità eco-sistemica intrinseca a queste situazioni, di ulteriori sviluppi metodologici e sperimentali al fine di rendere la tecnologia in esame applicativa ed utile alle prassi assestamentali e gestionali.

L'**obiettivo generale** del progetto AliForMiDi è stato quello di testare l'applicazione dei dati inerenti la struttura delle foreste (dati ottenibili previa opportuna elaborazione dei rilievi laser scanning) per il monitoraggio degli ecosistemi forestali da diversi punti di vista: caratterizzazione delle categorie forestali, quantificazione della biomassa e degli stock di carbonio nei diversi pool ed infine per una caratterizzazione dell'effetto del "carico" della vegetazione e della coesività radicale nella stabilizzazione dei versanti.

Più in dettaglio, gli obiettivi specifici sono stati:

- 1) sperimentare i metodi di analisi di dati laser scanning in alcune delle situazioni forestali più caratteristiche della Regione Friuli Venezia Giulia al fine di realizzare mappe GIS della struttura verticale ed orizzontale e della densità del bosco;
- 2) studiare e testare un metodo per calcolare il volume legnoso, la biomassa epigea ed ipogea e gli stock di carbonio nelle aree boscate, soprattutto per quanto riguarda le fasi evolutive giovani nei boschi monoplani (novelletti e spessine) e le fustaie multiplane miste;
- 3) verificare l'applicabilità dei dati laser scanning per la stime del legno morto presente in foresta (coarse woody debris);
- 4) verificare l'applicabilità dei dati laser scanning per la caratterizzazione della vegetazione forestale, l'elaborazione di indici per l'individuazione di foreste ad alto valore naturalistico (HNVF) e la costruzione di cartografia vegetazionale;
- 5) confrontare il carico (piani, struttura, tipologia, volume e massa) portato dalla copertura forestale sul primo metro di suolo ed i valori di coesività radicale. Modellazione della fragilità territoriale per finestre critiche a partire da dati LiDAR (DTM e uso del suolo); gestire tutti i dati ottenuti dalle elaborazioni in un Sistema Informativo Territoriale che consenta di produrre informazioni di natura statistica sulle aree oggetto di indagine.

I prodotti della ricerca, oltre alla presente relazione, sono costituiti dai seguenti strati informativi:

- Modello Digitale del Terreno ad elevata risoluzione (supporto informatico);
- Cartografia delle aree boscate con particolare attenzione allo studio delle zone di ecotono (supporto informatico e Tavola 1);
- Carta delle formazioni a prevalenza di conifere e delle formazioni con prevalenza a latifoglie (supporto informatico e Tavola 2);
- Cartografia tematica della struttura e della densità della vegetazione (supporto informatico e Tavola 3);
- Carta della provvigione legnosa (supporto informatico e Tavola 4);
- Carta degli stock di carbonio per tipo strutturale e/o categoria forestale esaminati (supporto informatico e Tavola 5);
- Carta fitosociologica della vegetazione forestale (supporto informatico e Tavola 6).

2. MATERIALI E METODI

2.1 Area di studio

2.1.1 Inquadramento territoriale

L'area di studio è localizzata in comune di Tarvisio, località Fusine in Valromana (1688 ha; 46°30'15" N; 13°38'26" E, regione bio-geografica Alpina), in prossimità del confine italo-sloveno (Figura 1).

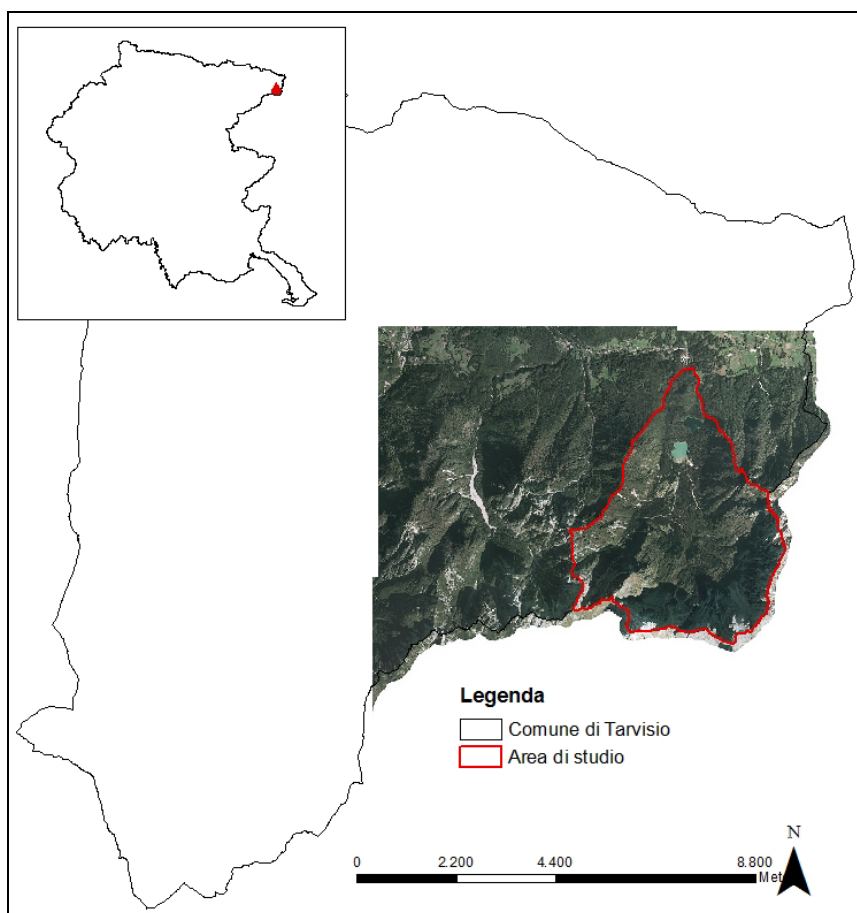


Figura 1: localizzazione dell'area di studio a livello regionale (figura in alto) e comunale

I complessi montuosi circostanti fanno sì che l'elevazione massima del terreno raggiunga i 2677 m (M. Mangart), mentre la quota minima sia di 838 m.

L'azione dei ghiacciai tardo-quaternari e degli agenti atmosferici ha modellato profondamente la morfologia del territorio portando, oltre all'accumulo di detriti alla base dei canali, anche alla formazione di due laghi alpini. La fase di ritiro del ghiacciaio che occupava anticamente la valle, avvenuta circa 10000 anni fa, ha dato origine a un rilievo morenico di 130 m che trattiene le acque del lago Inferiore situato a 924 m s.l.m. Un secondo deposito morenico alto circa 28 m determina invece la depressione occupata attualmente dal lago Superiore che si trova a 928 m s.l.m.

Il sito presenta delle zone a pascolo di alta e mezza montagna, circondate dai boschi misti di conifere e latifoglie e puri di conifere (Tabella 1). In particolare, la zona dell'Alpe Vecchia, è interessata da un pascolo di alta montagna in cui l'attività è divenuta negli anni meno intensa. Anche sotto le pendici boschive al confine col lago Superiore, presso l'Alpe Tamer e l'Alpe del

Lago, si trova un'area a pascolo con vegetazione erbacea adattata al lungo innevamento e ai terreni superficiali, ghiaiosi e molto drenati.

Classe di uso del suolo	Superficie (ha)	%
Boschi misti	631	37.4
Rocce nude, rupi, affioramenti	471	27.9
Brughiere e Cespuglieti	261	15.5
Boschi di Conifere	208	12.4
Aree a pascolo naturale e praterie d'alta quota	77	4.6
Bacini d'acqua naturali	23	1.4
Boschi di latifoglie	12	0.7
Aree a vegetazione boschiva e arbustiva in evoluzione	3	0.2
<i>Totale area studio</i>	1688	

Tabella 1: superfici di uso del suolo e percentuale rispetto all'area di studio (Moland Land Use)

2.1.2 Aspetti geologici e pedologici

I complessi montuosi che circondano la conca di Fusine sono caratterizzati da dolomie e calcari dolomitici (Figura 2).

Nella conca a sud dei laghi e nei fondovalle in genere, sono presenti banchi detritici in prevalenza costituiti da dolomie anche miste a morene del Quaternario. I sedimenti ghiaiosi e sabbiosi sono caratterizzati da ottime a discrete caratteristiche geotecniche, sono variamente graduati con più o meno quantità di fino, abbastanza omogenei e buon grado di addensamento.

Dai complessi litologici in prevalenza dolomitici si originano i suoli compresi nella serie carbonica che, in relazione alle condizioni morfologiche ed ai caratteri della roccia madre possono dare origine a suoli più o meno evoluti. Questa serie include i suoli più primitivi e xerici, quali protorendzina e rendzina primitivi (leptosols) su cui si sviluppano formazioni vegetazionali rupicole, primitive e xeriche. Sono compresi inoltre i suoli mesici carbonatici, caratterizzati dalla presenza di depositi con componenti fini (morene) o di componenti terrigene intercalate alla matrice litologica. I rendzina, suoli più evoluti e brunificati (cambisols), spesso con lo strato superiore lisciviato ed acidificato (luvisols) caratterizzano i piceo-faggeti e i piceo-faggeti con abete bianco. Quest'ultimo si rinnova facilmente e si sviluppa nei primi anni ma trova difficoltà non appena il suo apparato radicale fittonante raggiunge gli strati sottostanti marcatamente carbonatici e spesso compatti.

I suoli formati su matrici litologiche non carbonatiche vengono definiti silicatici e comprendono i suoli mesici ed acidi. I primi sono freschi, profondi, ben evoluti e ricchi in limi e argille che si originano dalle formazioni marnoso-siltitico-argillitico-arenacee, in prevalenza del Werfeniano, ma anche del Permiano superiore più ricche in marne o del Ladinico (Buchenstein e Wenghen). Sono in genere suoli bruni con profilo A-B-C ben differenziati (cambisols) caratterizzati da condizioni generali livellate e scarsa lisciviazione degli orizzonti superiori.

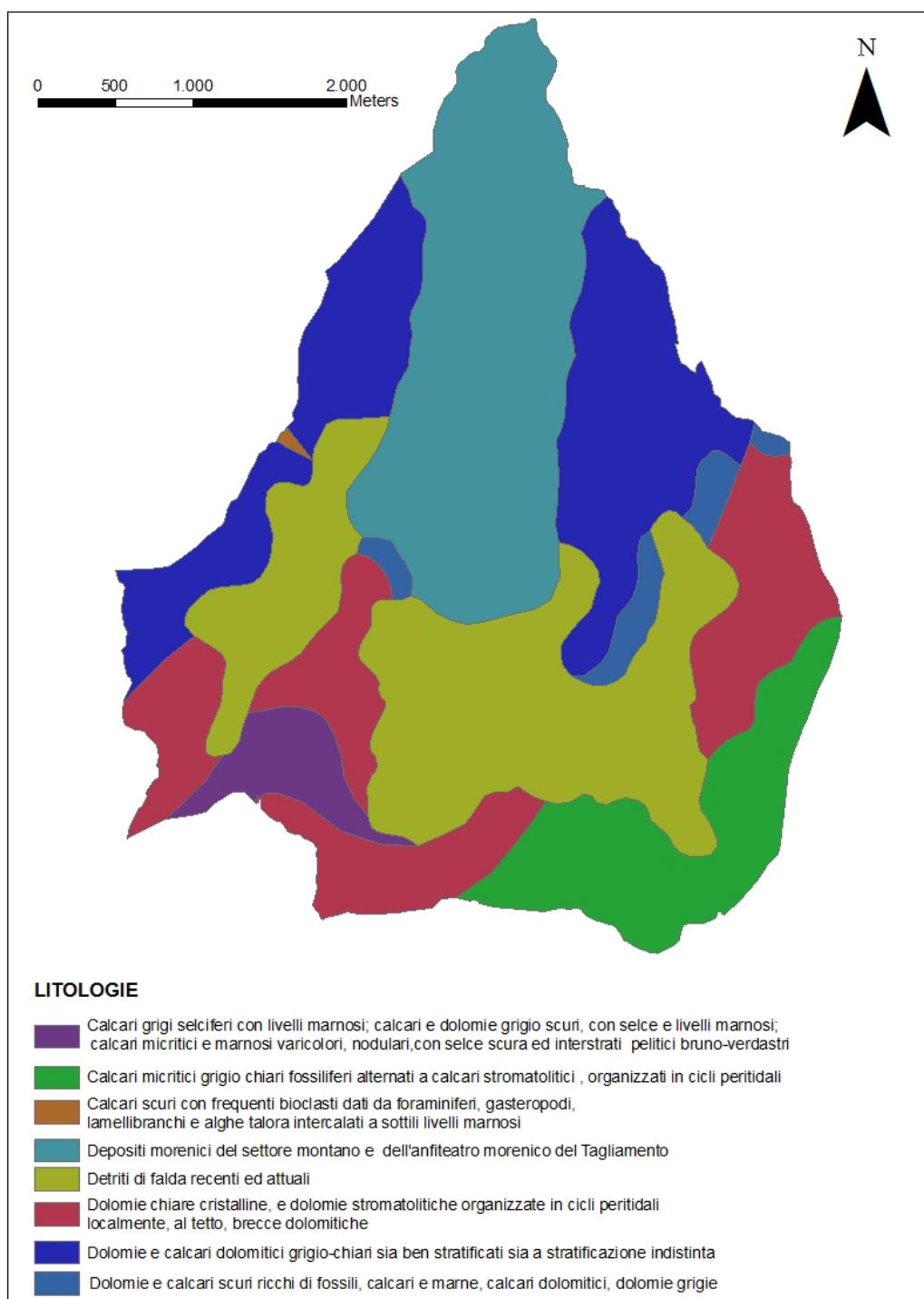


Figura 2: carta litologica (RAFVG, 2006)

2.1.3 Aspetti climatici

La particolare posizione geografica, l'elevata altitudine media e le caratteristiche orogenetiche fanno sì che la valle dei laghi di Fusine e le aree montuose circostanti vengano inserite nel contesto dei climi alpini. La conca di Fusine risulta chiusa ai venti meridionali dalla barriera del Mangart-Veunza e più aperta ai freddi venti settentrionali. Le brezze di monte dal versante settentrionale del gruppo del Mangart, scendono lungo il vallone e permangono in parte presso i laghi. Questo

fenomeno determina la presenza di un clima con caratteri di continentalità alpina piuttosto rigidi. Le temperature medie annue e stagionali possono essere significativamente diverse in base all'orientamento e all'inclinazione dei versanti, alla direzione e alla frequenza dei venti. I gradienti termici dal fondovalle alle zone in quota seguono un andamento piuttosto irregolare, con effetti di inversione climatica, significativi nella zona dei laghi.

Nel complesso, le precipitazioni risultano meno abbondanti rispetto alle altre zone della fascia alpina e prealpina a causa della presenza di masse d'aria umida provenienti dall'alto Adriatico che, nel risalire le Alpi Giulie, perdono gran parte della loro umidità sui primi rilievi.

A livello del lago Superiore nei mesi estivi di luglio e agosto i minimi termici possono arrivare a 6 °C, i massimi ai 28 °C, mentre nel mese di gennaio le temperature minime possono raggiungere anche i -25 °C. L'area è caratterizzata da una forte escursione termica, sia annuale che giornaliera. Quest'ultima, infatti, raggiunge quasi i 22 °C. Nelle zone prative più a monte, presso l'Alpe del Lago a 1000 m e alla Malga Tamer a 1025 m, l'ambiente è più freddo di quasi 2 °C.

La conca di Fusine è caratterizzata da un'altezza totale media annua delle precipitazioni di 1520 mm (sia pioggia che neve considerata fusa).

Si riporta di seguito l'andamento delle precipitazioni massime orarie attese rappresentato dalle linee segnalatrici di possibilità pluviometrica (LSPP) in funzione della durata crescente (1-24 ore) e del tempo di ritorno dell'evento piovoso.

La variabilità spaziale delle LSPP è espressa da tre parametri (a , n , cv), i quali rappresentano la relazione, per assegnato tempo di ritorno, tra l'altezza di pioggia che può cadere in un dato punto e la durata della precipitazione (t) secondo l'equazione:

$$h = at^n$$

dove

h : altezza della precipitazione attesa

a : coefficiente pluviometrico orario dipendente dal tempo di ritorno

n : coefficiente di scala

cv non appare nella formula in quanto rappresenta un coefficiente di variazione per la mappatura secondo il metodo GEV (Generalized Extreme Values).

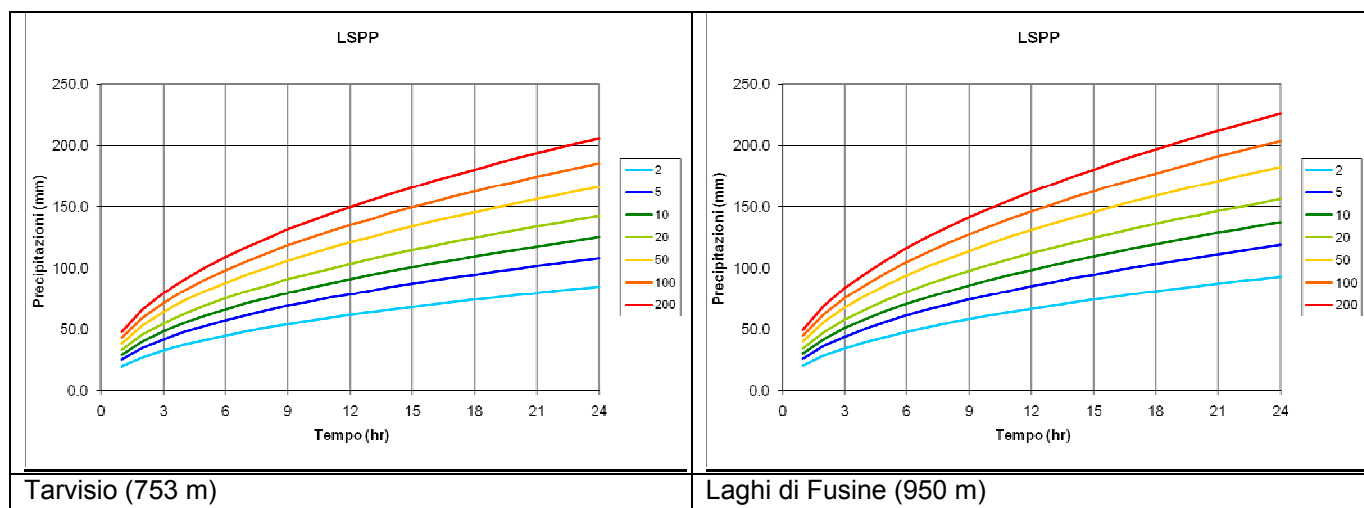
Nel presente studio sono stati selezionati quattro punti rispetto ai quali è stato eseguito il computo delle precipitazioni utilizzando l'applicativo RainMapFVG:

- 1) area compresa fra i due laghi;
- 2) area fra l'Alpe Vecchia e l'Alpe del Lago;
- 3) M. Mangart;
- 4) Tarvisio.

Le mappe che rappresentano la base dati degli eventi estremi di precipitazione utilizzate dall'applicativo RainMapFVG, sono state realizzate a partire dai dati rilevati dalle stazioni pluviometriche della regione fra il 1920 e il 1997 (Tabella 2).

Tempo (hr)	Tempo di ritorno (Anni)						
	2	5	10	20	50	100	200
Precipitazioni (mm) – Laghi di Fusine							
1	20.2	25.8	29.9	34.0	39.7	44.3	49.2
3	34.2	43.8	50.6	57.6	67.3	75.1	83.4
6	47.8	61.0	70.6	80.3	93.9	104.8	116.3
12	66.6	85.1	98.4	112.0	130.9	146.1	162.2
24	92.9	118.7	137.2	156.2	182.6	203.8	226.2
Precipitazioni (mm) - Alpe Vecchia / Alpe del Lago							
1	21.8	27.9	32.2	36.7	42.9	47.9	53.2
3	37.8	48.3	55.9	63.6	74.3	82.9	92.1
6	53.5	68.3	79.0	89.9	105.1	117.3	130.2
12	75.6	96.6	111.7	127.1	148.6	165.9	184.1
24	106.9	136.6	158.0	179.8	210.2	234.6	260.4
Precipitazioni (mm) - M. Mangart							
1	23.6	30.1	34.8	39.7	46.4	51.7	57.4
3	41.3	52.8	61.0	69.5	81.2	90.6	100.6
6	58.8	75.2	86.9	98.9	115.6	129.0	143.3
12	83.8	107.0	123.8	140.9	164.6	183.8	204.0
24	119.3	152.4	176.2	200.6	234.4	261.7	290.5
Precipitazioni (mm) - Tarvisio							
1	19.6	25.1	29.0	33.0	38.6	43.0	47.8
3	32.5	41.6	48.0	54.7	63.9	71.3	79.2
6	44.7	57.2	66.1	75.2	87.9	98.1	108.9
12	61.5	78.6	90.9	103.5	120.9	135.0	149.8
24	84.6	108.1	125.0	142.3	166.3	185.6	206.1

Tabella 2: valori di altezza massima delle precipitazioni orarie attese in funzione della durata e del tempo di ritorno



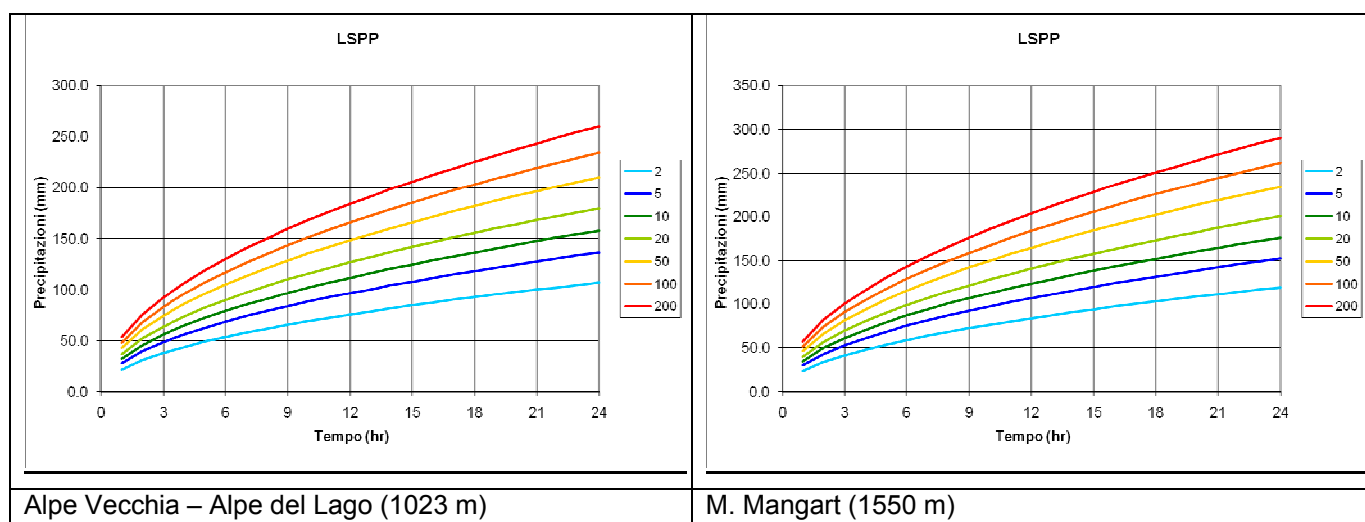


Figura 3: linee segnalatrici di possibilità pluviometrica calcolate per ogni punto considerato

2.1.4 La vegetazione forestale

Nell'area di studio la tipologia forestale prevalente è il Piceo-faggeto dei suoli mesici carbonatici (*Anemone trifoliae-Fagetum*), caratteristico di suoli che derivano da substrati calcarei o dolomitici, comprende circa il 48% (448 ha) delle aree boscate (Tabella 3). Il Piceo-faggeto è una formazione tipica del distretto mesalpico in cui, fra gli ambienti delle peccete e quelli delle faggete, si formano dei consorzi misti di abete rosso e faggio.

Nel sito sono presenti i sottotipi montano e altimontano la cui composizione arborea è caratterizzata dalle specie: *Picea abies* K., *Fagus sylvatica* L., *Sorbus acuparia* L., *Acer pseudoplatanus* L., *Sorbus aria* L., *Larix decidua* Mill., *Abies alba* Mill. Nel sottobosco sono diffuse le specie di mirtillo nero, eleboro e *Anemone trifolia* L.. Lo strato arbustivo è generalmente povero di specie, la più frequente è *Daphne mezereum* L.. Il Piceo-faggeto dei suoli mesici carbonatici montano si estende per circa 366 ha, è il sottotipo maggiormente diffuso e occupa il piano montano fino a circa 1300-1400 m. Oltre i 1300-1400 m si trova il sottotipo altimontano caratterizzato da una maggiore presenza di specie di *Vaccinio-Picetalia*. Sui substrati sciolti abbastanza stabilizzati, in prossimità dei fondovalle si estende per circa 164 ha il piceo-faggeto dei suoli xerici (*Anemone trifoliae-Fagetum sylvaticae*). La xericità superficiale del suolo è indicata da varie specie di *Erico-Pinetalia*, dal ginepro e dalla presenza frequente nello strato arboreo del pino silvestre. Lo strato arboreo è dominato dall'abete rosso e dal faggio.

Oltre il limite degli alberi, dai 1200 ai 2000 m, sono presenti formazioni a pino mugo tipico dell'ambiente mesalpico, in particolare mughete microterme dei suoli basici e mughete mesoterme con sottotipo mesoendalpico che coprono circa 132 ha (14% delle aree a bosco).

Alcune superfici boscate, per un'estensione complessiva di circa 96 ha (10%), sono caratterizzate da una netta prevalenza di larice. Si tratta della tipologia forestale a lariceto primitivo, tipica delle zone rupicole, e a lariceto tipico dei substrati carbonatici. Quest'ultimo è dominato da *Larix decidua* Mill. in cui talvolta partecipano in modo minoritario l'abete rosso e, più raramente, il faggio. Queste formazioni sono presenti soprattutto su suoli superficiali, derivati da substrati calcarei e dolomitici.

Il sito presenta alcune porzioni di territorio caratterizzate dalla presenza di peccete montane secondarie (*phytoceonon Carex alba-Picea*), circa 48 ha, per la maggior parte si estendono in località Alpe del Lago, a monte dei laghi di Fusine. Le peccete secondarie montane sono spesso

situazioni transitorie, alterate dagli interventi selvicolturali o dal pascolo. La composizione arborea comprende le specie: *Picea abies* K., *Fagus sylvatica* L., *Sorbus aria* L., *Sorbus aucuparia* L. La presenza della pecceta montana rispecchia le condizioni climatiche locali del continentalismo di fondovalle.

Le faggete montane presenti nel sito occupano una superficie complessiva di 12 ha. Il sottotipo mesalpico (*p.p. Dentario pentaphylli-Fagetum sylvaticae*; *p.p. Anemone trifoliae-Fagetum sylvaticae*) è caratterizzato dalla presenza dell'abete rosso. Infatti, le frequenti gelate tardive e una lieve diminuzione delle precipitazioni durante il periodo primaverile, riducono la capacità competitiva del faggio favorendo la diffusione dei semi dalle adiacenti peccete.

Sul versante occidentale del monte Svabrezza, a monte dei laghi di Fusine si estende per circa 21 ha una pineta di pino silvestre mesalpica con faggio e abete rosso (*p.p. Anemonotrifoliae-Fagetum sylvaticae*), tipica dei medio versanti esposti a sud. Il sottobosco è dominato, da *Erica herbacea* L., *Brachypodium caespitosum* (Host) Roemer e *Carex alba* Scop. Le specie che caratterizzano la composizione arborea sono *Pinus sylvestris* L., *Fagus sylvatica* L., *Picea abies* Karst, *Acer pseudoplatanus* L., *Fraxinus excelsior* L., *Abies alba* Mill.

Categoria forestale	Tipo forestale	Superficie (ha)	%
Faggete	Faggeta montana tipica mesalpica	12.4	1.3%
Lariceti	Lariceto primitivo	48.8	5.2%
	Lariceto tipico dei substrati carbonatici	46.9	5.0%
Mughete	Mugheta mesoterma mesoendalpica	56.9	6.1%
	Mugheta microterma dei suoli basici	75.5	8.1%
Peccete	Pecceta azonale su alluvioni	7.9	0.8%
	Pecceta dei substrati carbonatici altimontana, var. montana	10.7	1.1%
	Pecceta secondaria montana	47.7	5.1%
Piceo-faggeti	Piceo-faggeto dei suoli mesici carbonatici altimontano	36.1	3.9%
	Piceo-faggeto dei suoli mesici carbonatici altimontano, var. con larice	46.3	4.9%
	Piceo-faggeto dei suoli mesici carbonatici montano	361.6	38.6%
	Piceo-faggeto dei suoli mesici carbonatici montano, var. con larice	4.2	0.4%
	Piceo-faggeto dei suoli mesici montano	0.2	0.0%
	Piceo-faggeto dei suoli xerici	90.8	9.7%
	Piceo-faggeto dei suoli xerici, var. con larice	69.4	7.4%
Pinete di pino silvestre	Pineta di pino silvestre mesalpica con faggio e abete rosso	21.3	2.3%
TOTALE		936.6	100%

Tabella 3: estensione delle categorie e dei tipi forestali nell'area di studio (banca dati dei Tipi forestali del Friuli Venezia Giulia, 1997-1999).

2.1.5 Dati dendrometrico-assessmentali

Entro l'area di studio considerata ai fini del progetto ricadono 13 particelle forestali appartenenti alla Foresta Regionale di Fusine in Valromana (Tabella 4; Figura 4).

Complessivamente la superficie assestata ricadente all'interno del sito è pari a 655 ha. Delle 13 particelle forestali, 7 sono rappresentate da boschi di produzione, 4 da boschi lasciati alla libera evoluzione, una particella ha destinazione turistico ricreativa ed una particella è improduttiva.

I tipi forestali ricadenti all'interno delle particelle assestate sono per lo più popolamenti coetanei monoplani o coetanei biplani (piceo-faggeti). Complessivamente, la provvigione media reale della classe di produzione B è pari a $191 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, mentre la provvigione media reale della classe C è pari a $206 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. L'incremento corrente di volume è pari a $4 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$ per la classe B. La ripresa prevista dal piano 1997-2008 è pari all'84% dell'incremento corrente.

La forma di trattamento prevista dal piano di gestione forestale è a tagli successivi evitando il più possibili i tagli successivi uniformi ma orientandosi verso i tagli successivi per gruppi o i tagli di margine. Il trattamento a tagli successivi per gruppi è quello che più si avvicina al taglio saltuario per le strutture cui può dar luogo, che si discostano tanto più dalla coetaneità quanto più si creano e si liberano con intelligenza i nuclei di novellame. Data l'elevata presenza di bosco in rinnovazione dalla fase di taglio di sementazione appena avvenuto a quella di novelletto ormai affermato con sottoresidui del vecchio ciclo, il piano prevede di concentrare gli interventi di utilizzazione in queste aree evitando il più possibile di mettere in rinnovazione altre zone di bosco maturo ancora chiuso. Tuttavia, ove siano presenti nuclei di rinnovazione, il piano prevede la possibilità di procedere ad eseguire il taglio di sementazione anche nel bosco sub-maturo e maturo.

Di seguito è riportata una descrizione sommaria dei soprassuoli presenti nelle diverse particelle forestali assestate ricadenti all'interno dell'area di studio.

N. particella	Superficie complessiva (ha)	Superficie all'interno dell'area di studio (ha)	Destinazione d'uso
15	66.24	66.24	Bosco a libera evoluzione classe D
17	91.80	91.80	Bosco a libera evoluzione classe D
14C	112.55	112.55	Bosco a libera evoluzione classe D
16A	27.51	27.51	Produzione classe B
16B	9.53	9.53	Produzione classe B
16C	34.08	34.08	Produzione classe B
18A	13.47	13.47	Produzione classe B
18B	22.38	22.38	Produzione classe B
18C	19.98	19.98	Produzione classe B
18D	26.46	26.46	Produzione classe B
19A	43.75	43.75	Turistico ricreativa classe C
19B	13.61	13.61	Bosco a libera evoluzione classe D
A	210.85	173.53	improduttivo
Totale	692.21	654.89	

Tabella 4: descrizione delle particelle forestali della Foresta Regionale di Fusine e Val Romana ricadenti all'interno dell'area di studio. **Produzione classe A:** dominanza di suoli profondi ed evoluti rientranti nella categoria dei suoli mesici cui corrisponde una dominanza degli abieti-piceo-faggeti dei suoli mesici e dei piceo-faggeti della serie silicatica. È la classe colturale maggiormente produttiva; **produzione classe B:** suoli su substrati carbonatici cui corrispondono piceo-faggeti della serie carbonatica talora con abete bianco o larice. Fertilità 5, 6, eccezionalmente 7.

Particella 15

Piceo faggeto dei suoli mesici carbonatici montano: nella fascia inferiore, sub pianeggiante, fustaia matura di abete rosso e faggio con sporadico larice ed abete bianco con locali tratti a spessina ad abete rosso e faggio.

Piceo faggeto dei suoli xerici: nella fascia verso Nord, sempre nella parte inferiore, aumenta la partecipazione del pino silvestre.

Piceo-faggeto dei suoli xerici variante con larice: presente con una fascia continua sopra il piceo-faggeto dei suoli mesici carbonatici montano.

Lariceto primitivo: formazioni irregolari ed invecchiate a larice ed abete rosso con pino silvestre presenti nella fascia intermedia della particella; verso sud tratti meno ripidi dove al consorzio si associano il faggio e sporadicamente l'abete bianco; formazioni più stentate verso Nord.

Mugheta microterma dei suoli basici: presente in maniera discontinua sopra il lariceto primitivo.

Lariceto tipico dei substrati carbonatici: al limite superiore fustaia vetusta e stentata di larice, assai rada con singole piante di abete rosso ramoso o rastremate e qualche raro faggio cespuglioso. Vaste radure a mirtilli, rododendro ecc. con stentate piantine di abete rosso.

Provvigione unitaria: $129 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$

Incremento: $1.6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$

Metodo di stima: sintetico-comparativa

Particella 17

Piceo faggeto dei suoli mesici carbonatici montano: domina sulla maggior parte della particella con prevalenza della fase a faggio. La struttura dominante è quella monoplana adulto matura con gruppetti di rinnovazione sia sotto copertura che in tratti più aperti.

Presenti anche: piceo-faggeto dei suoli xerici variante con larice; lariceto primitivo; piceo-faggeto dei suoli mesici carbonatici altimontano; idem variante con larice; lariceto tipico dei substrati carbonatici; mugheta microterma dei suoli basici.

Provvigione unitaria: $280 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$

Incremento: $4.2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$

Metodo di stima: sintetico-comparativa

Particella 14C

Pecceta azonale su alluvioni: nella parte inferiore della particella, lembo di fustaia matura localmente in rinnovazione ad abete rosso prevalente e faggio. Sporadico pino silvestre.

Piceo-faggeto dei suoli mesici carbonatici montano: nella fascia inferiore verso Sud, prevalente della fustaia irregolare di abete rosso e faggio, rada e di portamento mediocre; nella parte centrale perticaia di abete rosso e faggio e larice di buon portamento; verso Nord, fustaia matura di abete rosso con faggio discretamente denso.

Presenti anche: mugheta meso-endalpica; mugheta microterma dei suoli basici; lariceto primitivo; piceo-faggeto dei suoli xerici var. con larice; pineta di pino silvestre mesalpica con faggio ed abete rosso; piceo faggeto dei suoli mesici carbonatici altimontano var. con larice; lariceto primitivo con faggio ed abete rosso dei suoli carbonatici.

Provvigione unitaria: $189 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$

Incremento: $2.4 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$

Metodo di stima: sintetico-comparativa

Particella 16A

Pecceta azonale su alluvioni: presente nella fascia più a Nord con una fustai matura ed irregolare Piceo-faggeto dei suoli xerici: formazione nel complesso irregolare, a tratti lacunosi, ma in via di chiusura, e coetanea per gruppi. I nuclei adulti e maturi sono costituiti in prevalenza dall'abete rosso con un po' di faggio e sporadico larice. Nei nuclei di spessina e nel novellame, aumenta la presenza di faggio.

Piceo-faggeto dei suoli mesici carbonatici montano: presente diffusamente su tutto il resto della particella; in genera fustaia matura ad abete rosso con un po' di faggio in rinnovazione e tratti di spessina ad abete rosso e faggio con poco abete bianco.

Provvigione unitaria: $206 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$

Incremento: $5.2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$

Metodo di stima: aggiornamento inventario

Particella 16B

Piceo-faggeto dei suoli mesici carbonatici montano: fustaia matura con rinnovazione diffusa di abete rosso soprattutto nelle buche e faggio sotto copertura. Nella rinnovazione compare sporadicamente un po' ovunque l'abete bianco. Verso Nord, piccoli nuclei di spessina ad abete rosso, ma soprattutto faggio.

Provvigione unitaria: $166 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$

Incremento: --- $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$

Metodo di stima: aggiornamento inventario

Particella 16C

Piceo-faggeto dei suoli mesici carbonatici montano: nella fascia inferiore a contatto con la 16A e 16B, spessina prevalente ad abete rosso, faggio e sporadico abete bianco. Sotto i tratti di fustaia matura, nuclei di novelletto. Nella parte restante della particella, ampia diffusione del faggio in tutto il corpo centrale; verso Est estesa spessina di faggio a tratti molto densa con piccoli nuclei in parte stentati di abete rosso; nella parte superiore, fustaia in genere matura di abete rosso e faggio con rinnovazione a tratti abbondante di faggio. Verso le particelle 15 e 17, in basso, novelletti ad abete rosso e faggio.

Provvigione unitaria: $144 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$

Incremento: $2.5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$

Metodo di stima: sintetico-comparativa

Particella 18A

Pecceta secondaria montana: nella parte meridionale, a contatto con le part. 16C e 18B, ed in parte in quella centrale, prevalenza di perticaia ad abete rosso, dense e più giovani verso sud-est, altrove a densità normale o rada. A Sud dei prati, fascia di fustaia di abete rosso adulta. Faggio nel complesso poco presente, praticamente assente in aree in rinnovazione o novelletti; verso Nord, spessine di abete rosso con qualche soggetto maturo sovrastante.

Provvigione unitaria: $217 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$

Incremento: $5.1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$

Metodo di stima: cavallettamento

Particella 18B

Piceo-faggeto dei suoli mesici carbonatici montano: nella fascia centrale e superiore, spessine a faggio prevalente con abete rosso a tratti molto dense nella parte centrale e a confine con la 18C con frammisti residui del vecchio ciclo; nella parte medio alta, sotto un piceo-faggeto maturo o adulto, rinnovazione prevalente di faggio. Il novellame di abete rosso è presente ma di gran lunga inferiore a quello del faggio; spessina densa a faggio prevalente ad Est.

Pecceta secondaria montana: nella fascia inferiore, perticaia ad abete rosso con faggio a tratti giovane e molto densa.

Provvigione unitaria: $54 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$

Incremento: $1.1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$

Metodo di stima: sintetico-comparativa

Particella 18C

Piceo-faggeto dei suoli mesici carbonatici montano: nella fascia inferiore, spessina di faggio frammista ad abete rosso verso il confine con la 18B; per il resto, prevalenza della fustaia matura di abete rosso e faggio in rinnovazione o ancora chiusa. Nella parte centrale, tratti di spessina mista ad abete rosso e faggio. Nella parte alta, prevale la fustaia più o meno matura con rinnovazione in fase di iniziale insediamento. Verso il confine con la part. 17, sporadica rinnovazione dell'abete bianco e più consistente dell'acero montano sotto fustaia matura di abete rosso e faggio. Lembo di spessina a faggio con abete rosso sotto strada nella parte alta della particella verso Sud.

Provvigione unitaria: $171 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$

Incremento: $2.9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$

Metodo di stima: sintetico-comparativa

Particella 18D

Piceo-faggeto dei suoli mesici carbonatici altimontano: nell'estrema fascia superiore, fustaia matura talora abbastanza irregolare e rada, talora monostratificata e più chiusa con abeti rossi, spesso ramosi, e faggi, con fusto sciabolato alla base; rinnovazione abbastanza diffusa di faggio, abete rosso ed acero montano.

Piceo-faggeto dei suoli mesici carbonatici montano: si estende su quasi tutta la particella con maggiore presenza di faggio. Prevale la fustaia matura o adulta con rinnovazione più o meno abbondante, prevalentemente di faggio. Fascia di spessina a faggio ed abete rosso verso Est nella parte centrale ed inferiore.

Provvigione unitaria: $382 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$

Incremento: $5.6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$

Metodo di stima: sintetico-comparativa

Particella 19A

Piceo-faggeto dei suoli mesici carbonatici montano. Fascia a Nord: nella parte settentrionale, perticaia e fustaia adulta in genere densa a tratti dominata dall'abete rosso, a tratti in mescolanza con il faggio; salendo verso Est, perticaie miste con presenza di pino silvestre; verso Ovest, prevalenza della fustaia matura, in parte in rinnovazione di faggio con abete rosso; ad Est, prevalenza di perticaie a tratti dominate dall'abete rosso, a tratti mescolate con faggio, e spessine miste con qualche soggetto stra-maturo.

Fascia centrale (tra i laghi): in tutta la parte centrale, prevale la fustai matura e str-matura di abete rosso, con faggio nel piano dominato, in genere abbastanza rada e con rinnovazione frequente di

faggio; verso il confine con la 19B, fustaia adulta ed alta perticaia dominata dall'abete rosso con poco faggio e sporadico abete bianco in genere densa; verso Nord-ovest, spessine dominate dal faggio, con residui del vecchio ciclo sia di abete rosso che di faggio; a Est, fustaia adulta e matura di abete rosso e faggio con rinnovazione sparsa delle stesse specie.

Fascia Sud (sotto il secondo lago): nella parte occidentale, prevalenza della fustaia adulta e della perticaia a tratti dominata dall'abete rosso, a tratti dal faggio, e a tratti in mescolanza; verso Est, prevalenza della fustaia matura di abete rosso con faggio in genere nel piano dominato, in parte in rinnovazione; tratti di spessine con entrambe le specie.

Provvigione unitaria: $275 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$

Incremento: $4.1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$

Metodo di stima: sintetico-comparativa

Particella 19B

Piceo-faggeto dei suoli mesici carbonatici montano: nella fascia inferiore, fustaia adulta e perticaia ad abete rosso prevalente, con faggio e sporadico abete bianco, generalmente densa.

Piceo-feggeto dei suoli xerici var. con larice: nella fascia intermedia formazioni irregolari con larice, abete rosso, pino silvestre ed un po' di faggio.

Piceo faggeto dei suoli mesici carbonatici altimontano var. con larice: discreta fustaia matura ad abete rosso e larice, con faggio interposto, con frequenti soggetti secchi o deperienti.

Provvigione unitaria: $226 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$

Incremento: $3.4 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$

Metodo di stima: sintetico-comparativa

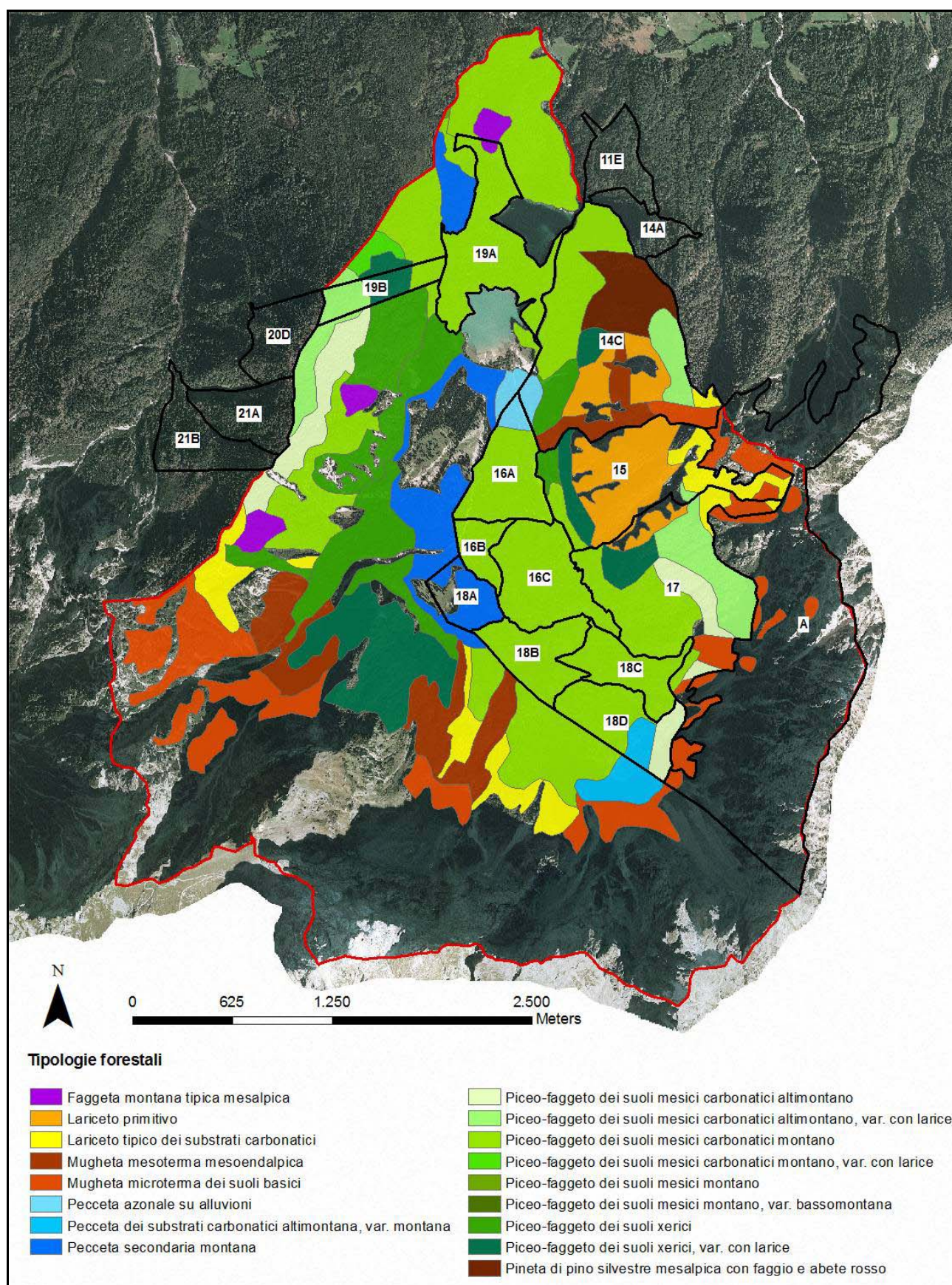


Figura 4: area di studio con le particelle forestali del piano di gestione della Proprietà Regionale di Fusine in Valromana con indicazione delle principali tipologie forestali presenti (RAFVG, 2006).

2.1.6 Strumenti di tutela

L'intera area di studio è tutelata dalla Direttiva 92/43/CEE "Habitat" per la presenza del Sito di Interesse Comunitario "Conca di Fusine" (IT3320006), e in parte dalla L.R. 42/1996 "Norme in materia di parchi e riserve naturali regionali" per la presenza dell'area di reperimento prioritario "Laghi di Fusine" (Figura 5; Tabella 5).

Aree naturali tutelate	Nome	Superficie totale (ha)	Superficie area studio (ha)
SIC	Conca di Fusine	3598	1688
Aree di reperimento	Laghi di Fusine	1555	603

Tabella 5: superfici delle aree naturali tutelate che interessano l'area di studio.

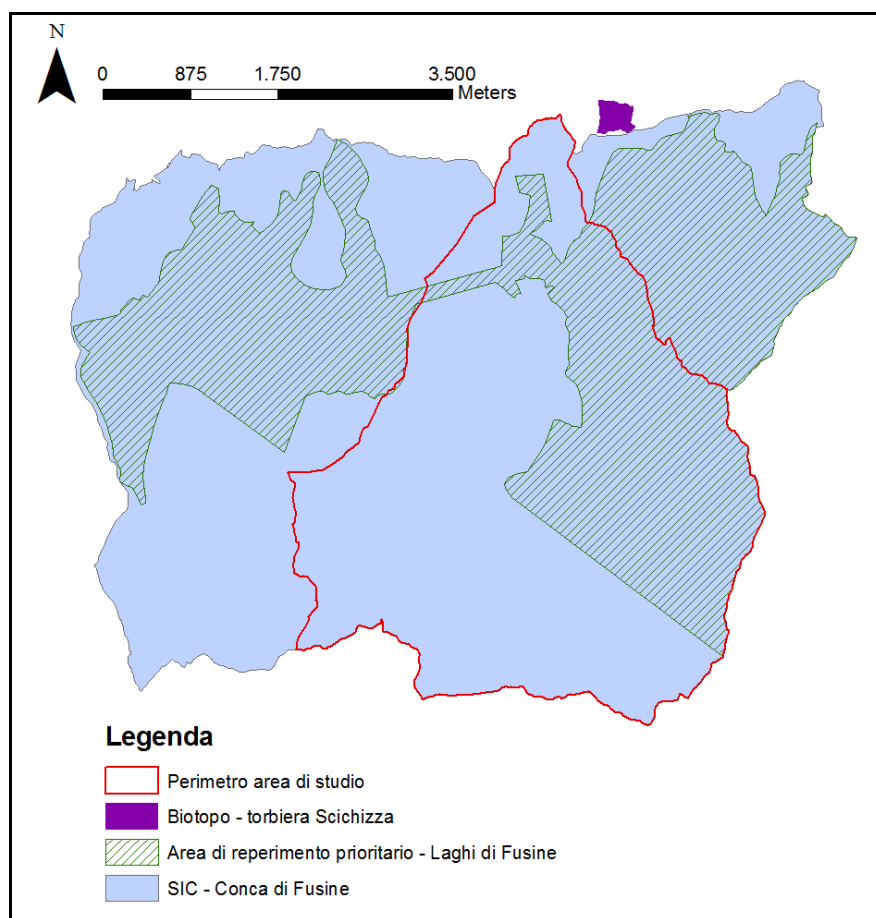


Figura 5: aree naturali tutelate (RAFVG)

Il sito è compreso interamente in area a vincolo idrogeologico (R.D.L.3267/23; L.R. 9/2007) che interessa la maggior parte del territorio comunale di Tarvisio (Figura 6). Inoltre, una superficie di circa 24 ha interna al perimetro di studio, presso la conca dei laghi di Fusine, è vincolata dal punto di vista paesaggistico ai sensi dell'art. 136 del D.Lgs 42/2004 come area di notevole interesse pubblico.

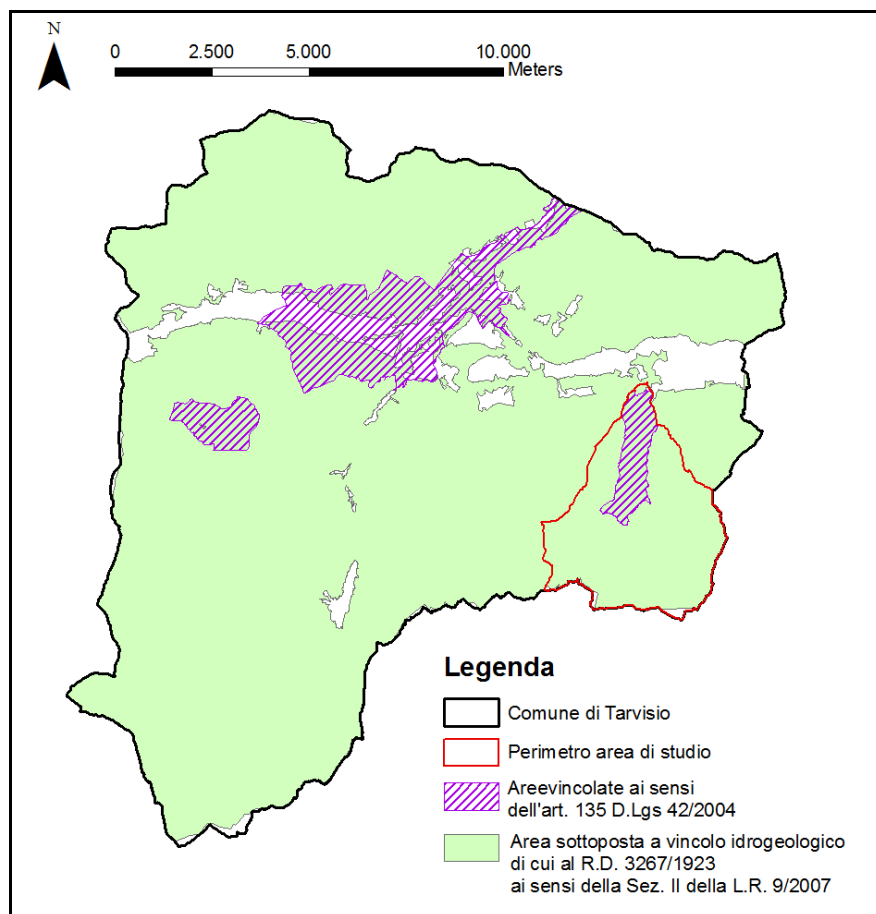


Figura 6: zone vincolate (RAFVG)

L'area di studio è caratterizzata dalla presenza di due siti di interesse geologico a valenza regionale, riconosciuti come beni paesaggistici-ambientali e patrimonio naturale e culturale. Si tratta dei geositi: laghi di Fusine e Masso Pirona; piega del Monte Mangart. Il primo caratterizzato da processi geomorfologici di tipo glaciale, crionivale e lacustre; il secondo da processi tettonico litologico, di interesse scientifico geologico strutturale. In particolare, la piega del Monte Mangart comprende le pareti settentrionali tra il piccolo Mangart di Coritenza e il Monte Traunig e rappresenta l'effetto dell'evento tettonico della fase dinarica del Cretaceo sup.-Eocene.

Il piano regolatore generale del comune di Tarvisio, in vigore dal 2009, classifica l'intera area come zona omogenea F delimitando gli ambiti di tutela ambientale di alta montagna, boschivi e silvo-zootecnici.

2.2 Rilievo laser e carta della struttura forestale

2.2.1 Acquisizione e processamento dei dati LiDAR

I dati LiDAR sono stati acquisiti in due diverse campagne di rilievo. La prima nel corso del mese di Ottobre 2006 con copertura di circa l'85% dell'area studio e la seconda nel Luglio del 2009 consentendo la copertura totale dell'area. Entrambi i rilievi sono stati effettuati con lo strumento Laser Scanner Optech ALTM 3100 installato su elicottero. I dati sono stati rilevati con modalità "multi pulse" (massimo 4 echi di ritorno per ogni impulso emesso) per ognuno dei quali è stata memorizzata l'intensità del segnale riflesso. I voli sono stati eseguiti da una quota nominale di circa 1000 m sul terreno, con un angolo di scansione di 18 gradi ed una divergenza del fascio luminoso pari a 0.2 mrad.

La densità media dei punti di campionamento LiDAR risultante all'interno dell'area è di circa 2.8 pti m⁻², come riportato in Tabella 6 (Fusine_mask – Punti tot m⁻²). La stessa tabella riporta i dati di densità relativi alle particelle forestali ricadenti all'interno dell'area studio, con indicazione della densità dei soli punti ground come derivanti dal filtraggio dei dati (vedi par. 2.2.2) e dei punti vegetazione classificati per criteri di altezza rispetto al terreno (vedi par. 2.2.4).

Nome	Area (m ²)	Area (ha)	Punti totali	Punti tot/m ²	Punti ground	Punti g/m ²	Punti vegetazione	Punti veg/m ²
FUS08F017K	885662.95	88.57	2444045	2.76	560944	0.63	1860256	2.10
FUS08F017K	32285.46	3.23	80792	2.50	21431	0.66	59224	1.83
FUS08E015K	662435.79	66.24	2196342	3.32	496466	0.75	1670651	2.52
FUS08A001K	2108521.09	210.85	5575543	2.64	2698789	1.28	2732864	1.30
FUS08F016C	340829.90	34.08	830109	2.44	117852	0.35	711417	2.09
FUS08E014C	1125467.66	112.55	4513307	4.01	750422	0.67	3725723	3.31
FUS08F019A	437529.55	43.75	1711518	3.91	137381	0.31	1570677	3.59
FUS08F018B	223778.52	22.38	390878	1.75	65913	0.29	324475	1.45
FUS08F018A	134737.22	13.47	207428	1.54	64434	0.48	142903	1.06
FUS08E019B	136117.59	13.61	802021	5.89	80200	0.59	720234	5.29
FUS08F016A	275089.22	27.51	707063	2.57	162296	0.59	543677	1.98
FUS08F016B	95269.87	9.53	197881	2.08	55264	0.58	142467	1.50
FUS08F018C	199833.89	19.98	316451	1.58	61400	0.31	254735	1.27
FUS08F018D	264642.62	26.46	667456	2.52	122113	0.46	543855	2.06
Fusine_mask	16885730.73	1688.57	47451791	2.81	13977984	0.83	33013455	1.96

Tabella 6: caratteristiche del volo LiDAR

2.2.2 Pre-processamento dei dati laser

I dati acquisiti sono stati elaborati utilizzando il software ZEUS della E-LASER Srl al fine di ottenere una classificazione dei punti laser in terreno e vegetazione mediante una procedura semi-automatica di “filtraggio”. Quest’ultima si basa sull’algoritmo a “densificazione di maglie triangolari TIN” (Axelsson P., 2000) implementato nel software. Successivamente all’applicazione automatica dell’algoritmo è stata applicata una procedura di raffinamento manuale, in modo da correggere i risultati del filtraggio nelle aree di più complessa morfologia.

A partire dai punti terreno precedentemente filtrati, è stato realizzato il Modello Digitale del Terreno (DTM) in formato raster costituito da celle con dimensione spaziale di 1m x 1m, successivamente utilizzato per calcolare l’altezza dei singoli alberi.

2.2.3 Estrazione e parametrizzazione morfometrica dei singoli alberi

I singoli alberi sono stati individuati attraverso una sequenza specifica di trasformazioni morfologiche sui dati LiDAR precedentemente classificati. A tal scopo è stato utilizzato il metodo presentato in Barilotti et al. 2007.

Il metodo si basa sull’algoritmo Top Hat, una funzione di morfologia matematica che deriva dalla teoria dell’elaborazione delle immagini esposta da Serra (1982, 1988). Tale funzione, originariamente sviluppata per estrarre gli elementi di picco di una immagine raster, è stata opportunamente adattata, permettendo di rilevare la posizione spaziale (coordinate x, y, z) degli apici direttamente sulla nuvola di punti. Si assume che le coordinate x, y degli stessi apici corrispondono alla posizione cartografica dei singoli alberi. Di conseguenza l’altezza degli alberi è stata determinata sottraendo al valore di quota dei punti classificati come apici il valore di altezza del terreno sottostante, così come espresso dal DTM raster.

Attraverso la definizione di un algoritmo di *cluster analysis* sono stati identificati i punti che dipendono dalle singole chiome. Le chiome sono state delineate utilizzando poligoni circolari il cui centro e raggio sono stati calcolati in funzione delle coordinate planimetriche (X_{max} , X_{min} , Y_{max} , Y_{min}) dei punti appartenenti ad ogni cluster. Si assume come centro della chioma il baricentro della distribuzione dei punti. Ogni cerchio viene rappresentato da un raggio (r) secondo un’equazione che consente di calcolare il raggio medio della distribuzione del cluster:

$$r = (X_{Max} - X_{Min} + Y_{Max} - Y_{Min}) / 4$$

La profondità della chioma viene calcolata come differenza fra l’altezza massima e minima dei punti appartenenti al cluster. Inoltre, viene calcolata l’altezza base della chioma in termini di differenza fra l’altezza dell’albero e la profondità della chioma stessa (C_depth). Il volume della chioma (C_vol) può essere determinato in base alla seguente equazione:

$$C_vol = CHM - [C_area * (tree_height - C_depth)]$$

dove C_area corrisponde all’area della chioma delineata.

2.2.4 Realizzazione della carta della struttura forestale

La cartografia della struttura forestale è stata realizzata in maniera automatica attraverso un metodo originale di analisi della seriazione ipsometrica totale degli alberi ottenuta con la procedura descritta al paragrafo precedente. Il metodo si sviluppa in due fasi principali. Il primo passaggio consiste nella distinzione fra aree di bosco e non bosco. A tal scopo è stato applicato un algoritmo che

consente di individuare automaticamente le aperture della copertura forestale (*canopy gaps*) attraverso la classificazione dei valori espressi dall'LPI (Laser Penetration Index) (Barilotti et al. 2006). I pixel così classificati sono poi raggruppati in aree omogenee di bosco e non bosco, in base ai criteri di classificazione definiti dalla legge regionale 09/2007¹.

Nella seconda fase, al fine di identificare la struttura forestale, gli apici ricadenti all'interno delle aree di bosco sono stati suddivisi in opportune classi altimetriche (Tabella 7). Un successivo algoritmo di *region growing* ha consentito di delimitare le aree che presentano una distribuzione omogenea delle classi di altezza degli alberi. Se la distribuzione degli apici non era omogenea (in base ai parametri di dominanza di una classe rispetto ad un'altra), la superficie corrispondente è stata codificata come multiplana (o disetanea). Per determinare la tipologia strutturale delle aree omogenee, si è applicata infine un'analisi statistica della distribuzione delle altezze rilevate. Per la codifica delle classi strutturali si è fatto riferimento al prassi assestamentale (Del Favero et al., 2000).

Classificazione struttura	Struttura derivata	Altezza dei soggetti (m)	Note
Novelletto	Novelletto 1	$0 < h < 3$	Scarsa presenza di individui appartenenti alle classi superiori
	Novelletto 2		Presenza di individui delle classi superiori
Spessina	Spessina 1	$3 < h < 10$	Scarsa presenza di individui appartenenti alle classi superiori
	Spessina 2		Presenza consistente di individui delle classi superiori, ovvero residui del vecchio ciclo
Perticaia	Perticaia 1	$10 < h < 20$	Scarsa presenza di individui appartenenti alle classi superiori
	Perticaia 2		Presenza consistente di individui delle classi superiori, ovvero residui del vecchio ciclo
	Perticaia 3		Tendente alla struttura biplana
Fustaia adulta	Fustaia adulta	$18 < h < 25$	
Fustaia matura	Fustaia matura	$h > 25$	
Biplano	Biplano		Marcata presenza di 2 distinte classi altimetriche prevalenti
Multiplano	Multiplano		Distribuzione continua delle classi

Tabella 7: classi e sottoclassi strutturali come definite da Del Favero et al. (2000) e sottoclassi strutturali (Barilotti, 2009)

¹ Terreno coperto da vegetazione forestale arborea, associata o meno a quella arbustiva, di origine naturale o artificiale, in qualsiasi stadio di sviluppo, con un'estensione maggiore di 2000 m², larghezza media maggiore di 20 m e copertura arborea maggiore del 20%

2.3 Schema di campionamento e rilievi in campo

2.3.1 Metodologia di campionamento

Lo schema di campionamento utilizzato nel presente studio è stato il **campionamento stratificato**: esso consiste nella suddivisione della popolazione in sottopopolazioni omogenee, detti strati, e nell'estrazione delle unità campionarie indipendentemente in ciascuno strato. Gli strati sono stati identificati con le unità strutturali individuate dall'elaborazione dei dati LiDAR sull'intera area di studio. Essendo questi strati piuttosto omogenei al loro interno entro l'intervallo di variabilità definito in fase di realizzazione delle cartografie ottenute dai dati LiDAR, con questo schema di campionamento è stato possibile ottenere una precisione di stima significativamente maggiore rispetto al campionamento semplice.

2.3.2 Rilievi in campo: estrazione del campione

Si riportano di seguito le fasi di estrazione del campione:

- sovrapposizione all'area studio di un reticolo di punti a maglia regolare 100 m x 100 m, originato dalla griglia di riferimento della regione Friuli Venezia Giulia (Military Grid Reference System, MGRS; Unità di rilevamento 1 km x 1 km; UTM ED50 fuso 33), costituito da N unità (numerosità del campione);
- suddivisione dell'area di studio in strati in base all'uso del suolo e, per quanto riguarda il bosco, in unità strutturali. Ogni strato sarà costituito da N_j unità rappresentate dai punti del reticolo che ricadono all'interno di ciascuno strato in modo tale che:

$$N = \sum_{j=1}^M N_j$$

in cui N è la numerosità della popolazione e M è il numero di strati;

- estrazione di un certo numero di unità campionarie (non inferiore a 2) indipendentemente da ciascun strato.

La varianza dei valori di un attributo (per es. altezza media, volume ad ettaro) di una popolazione stratificata può essere interpretata come somma di due componenti (Tabella 8):

- a) una componente che deriva dalle differenze tra i valori delle medie a livello di singoli strati (la varianza tra gli strati è generalmente relativamente alta);
- b) una componente che deriva dalle differenze tra i valori delle singole unità campionarie di ciascun strato e la media dello strato stesso (la varianza entro gli strati è generalmente relativamente bassa).

Dato che la somma della devianza tra gli strati più la devianza entro gli strati è uguale alla devianza totale, a parità di quest'ultima, quando s^2_{TS} cresce, s^2_{NS} diminuisce e l'efficacia della stratificazione data dal rapporto tra $s^2_{TS} : s^2_{NS}$ aumenta in proporzione.

Sorgente di variazione	Gradi di libertà	Devianza	Varianza
Tra gli strati	M-1	$dev_{TS} = \sum_{j=1}^M n_j \times (\bar{x}_j - \bar{x}_{ST})^2$	$s^2_{TS} = \frac{dev_{TS}}{M-1}$
Entro gli strati	N-M	$dev_{NS} = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{n_j} (x_{ij} - \bar{x}_j)^2$	$s^2_{NS} = \frac{dev_{NS}}{N-1}$
Totale	N-1	$dev_{TOT} = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{n_j} (x_{ij} - \bar{x}_{ST})^2$	$s^2_{TOT} = \frac{dev_{TOT}}{N-1}$

Tabella 8: sorgente di variazione e stimatori (devianza e varianza)

La significatività statistica della differenza tra gli strati potrà essere valutata ad un determinato livello di sicurezza statistica tramite il rapporto tra la varianza degli strati e la varianza entro gli strati.

2.3.3 Stimatori campionari

Per quanto riguarda i singoli strati, lo stimatore del valore medio del j-esimo strato è pari a:

$$\bar{x}_j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} h_{ij}}{n_j}$$

dove x_{ij} è il valore dell'attributo x (per es. altezza, volume ad ettaro, densità ad ettaro, ecc.) nella i-esima unità campionaria del j-esimo strato (per es. perticaia); n_j è il numero di unità campionarie (numero di punti campionati) del j-esimo strato.

Se l'estrazione del campione avviene in blocco, lo stimatore delle varianze di x_{ij} è pari a:

$$s^2_{x_j} = \frac{s^2_{x_j}}{n_j} \times \frac{N_j - n_j}{N_j}$$

dove $s^2_{x_j}$ è lo stimatore della varianza di x nel j-esimo strato.

Lo stimatore del valore totale (per es. volume totale) dell'attributo x nel j-esimo strato è pari a:

$$X_j = N_j \times \bar{x}_j$$

con varianza stimata pari a:

$$s^2_{X_j} = N_j^2 \times s^2_{x_j}$$

Nel caso si voglia calcolare la media ponderata dell'attributo x nell'intera popolazione, essendo gli strati espressi in termini di superficie, si ha:

$$\bar{x}_{ST} = \sum_{j=1}^M \frac{A_j}{A} \times \bar{x}_j$$

dove A_j è la superficie del j-esimo strato nota senza errore; A è la superficie totale della popolazione nota senza errore.

Lo stimatore della varianza è pari a:

$$s^2_{x_{ST}} = \sum_{j=1}^M \left(\frac{A_j}{A}\right)^2 \times s^2_{x_j}$$

Lo stimatore del volume totale dell'attributo x nella popolazione è pari a:

$$X_{ST} = \frac{A}{a} x_{ST}$$

In cui a è la superficie di ciascuna area di saggio nella stessa unità di misura di A che è la superficie totale.

La varianza sarà pari a:

$$s^2_{x_{ST}} = \left(\frac{A}{a}\right)^2 \times s^2_{x_{ST}}$$

2.3.4 Frazione di unità campionarie in ciascuno strato

La distribuzione delle unità campionarie nei singoli strati (uso del suolo e classi strutturali nel caso del bosco) è stata stabilita in modo proporzionale alle loro dimensioni:

$$W_j = \frac{A_j}{A}$$

E quindi il numero di punti da allocare a ciascun strato è stato:

$$N_j = N_0 \times W_j$$

dove a è la superficie dell'area di saggio e N_0 è il numero totale di punti di campionamento.

2.3.5 Numerosità del campione

In generale, la numerosità campionaria complessiva può essere stabilita con riferimento al numero di osservazioni necessario a contenere l'errore di campionamento entro una certa soglia massima tollerata oppure con riferimento al numero massimo di osservazioni necessario a contenere il costo totale del campionamento entro un livello prefissato. Nel presente studio si è deciso, noto il costo complessivo di campionamento C_0 e stimato il costo medio di campionamento per area di saggio nel j-esimo strato c_j , di seguire la seconda strada. Pertanto il numero di osservazioni da eseguire in campo è stato calcolato secondo l'equazione:

$$N_0 = \frac{C_0 - c_f}{c_j}$$

in cui c_f sono costi fissi di campionamento indipendenti dalla numerosità del campionamento.

La numerosità del campione da allocare a ciascun strato è stata pari a:

$$n_{0_j} = n_0 \times W_j$$

Ciascun strato ha contenuto almeno due unità campionarie così da poter consentire la stima della media e della varianza dell'attributo oggetto di stima.

Nel caso specifico, assumendo un costo fisso di 500 euro per il noleggio del fuoristrada e la benzina per tutto il periodo di rilievo stimato in 10 giorni e un costo a rilievo di 120 euro (costo giornaliero di 360 euro con squadra di 5 persone e 3 punti campionari al giorno), il numero di osservazioni da eseguire in campo N_0 è stata pari a 37 punti.

2.3.6 Estrazione delle unità campionarie

Noto il numero di punti da campionare in ciascuno strato, l'estrazione dei punti in cui sono state realizzate le aree di saggio con i rilievi è stato effettuato in maniera casuale (Tabella 9).

Struttura forestale	N
Spessina 1, Spessina 2	5
Perticaia 1	2
Perticaia 2	7
Fustaia adulta, perticaia 3	7
Fustaia matura	7
Biplano	2
Multipiano	7
Totale punti	37

Tabella 9: numero di unità campionarie estratte in modo casuale per ogni tipologia di struttura forestale

Data la scarsa presenza di novelletti nell'area di studio, non sono stati collocati punti di campionamento in questa categoria strutturale.

2.4 Rilievi forestali e relative elaborazioni

Per ogni unità campionaria è stata definita un'area di saggio circolare con raggio pari a 13 m (531 m²; DBH > 7.5 cm; AdS_13) e un'area concentrica alla prima con raggio 4 m per rilievi di maggior dettaglio (50 m²; DBH < 7.5 cm; AdS_4), in funzione del valore del diametro misurato ad altezza petto (DBH, 1.30 m), secondo quanto indicato dall'Inventario Forestale Nazionale (INFC 2006). I rilievi dendrometrici eseguiti in ogni area di saggio comprendono:

- misura di DBH degli alberi in piedi;
- il rilievo della specie;
- rilievo del dendrotipo (individuo d'alto fusto, pollone, matricina, non determinabile);
- rilievo della vitalità (Tabella 10).

a) Rilievi dendrometrici

Per gli alberi in piedi è stato rilevato il diametro a 1.30 m, la specie, la vitalità (Tabella 10) ed il dendrotipo (1. individuo d'alto fusto, 2. pollone, 3. matricina, 4. non determinabile).

Nell'area AdS_4 sono stati misurati tutti gli individui aventi diametro maggiore o uguale a 4.5 cm ed inferiore a 7.5 cm, mentre nell'area AdS_13 sono stati misurati tutti gli alberi con diametro maggiore o uguale a 7.5 cm (classe 10). Anche il diametro dei soggetti deperienti, secchi o troncati

ad un'altezza superiore a 1.30 m dal suolo è stato rilevato con le modalità precedentemente descritte.

Classe di vitalità	Descrizione
1	Individuo vivo e privo di evidenti parti secche
2	Individuo vivo con parti secche in meno di un terzo della chioma
3	Individuo vivo con parti secche tra uno e due terzi della chioma
4	Individuo con parti secche per oltre due terzi della chioma
5	Individuo vivo ma con fusto troncato
6	Individuo completamente secco in piedi
7	Individuo secco in piedi ma con fusto troncato

Tabella 10: classi di vitalità definite dall'INFC

Per gli individui classificati come troncati e morti o completamente secchi in piedi, si è proceduto a definire la classe di decadimento del legno (1 – Individuo non decomposto; 2 – individuo parzialmente decomposto; 3 – individuo mediamente decomposto; 4 – individuo fortemente decomposto; 5 – individuo totalmente decomposto) sulla base dei seguenti criteri:

- corteccia:
 - o attaccata al legno → classe 1
 - o allentata → classe 2
 - o distaccata in parte → classe 3
 - o distaccata totalmente → classe 4 e 5
- rametti con diametro inferiore a 3 cm:
 - o presenti (classe 1)
 - o presenti in parte (classe 2)
 - o totalmente assenti (classe 3, 4 e 5)
- fusto:
 - o integro (classe 1 e 2)
 - o troncato nella parte apicale (classe 3)
 - o troncato nella parte centrale (classe 4)
 - o disgregato (classe 5)

Utilizzando i dati rilevati è stata determinata la distribuzione per classi di diametro delle piante. Il numero di piante per classe ottenuto è stato poi convertito in numero di piante ad ettaro in base alla superficie del rilievo e la sommatoria dei valori delle varie classi ha portato alla stima del numero totale di piante a ettaro, cioè della densità dell'area di saggio. Sulla base di questa distribuzione si è stimato anche il valore di area basimetrica.

L'altezza totale e di inserzione della chioma è stata misurata su 10 individui vivi ed integri (classe di vitalità non superiore a 2), a portamento regolare e non troppo inclinati nelle rispettive aree di saggio e distribuiti uniformemente nelle diverse classi di diametro e specie maggiormente rappresentate (AdS_4 ed AdS_13). Noti i dati di diametro e di altezza totale, sono state determinate le relative curve ipsometriche per specie utilizzando l'equazione:

$$H = a \times \ln(DBH) + c$$

in cui H è l'altezza totale (m), DBH è il diametro a 1.30 m (cm), a e b sono costanti.

Nota la curva ipsometrica, è stata determinata l'altezza di ciascuna pianta campionata ed è stata scelta la tariffa di cubatura più opportuna tra le tavole dendrometriche regionali al fine di determinare la provvigione unitaria di ciascun soprassuolo esaminato (Del Favero et al., 2000).

Le piante sono quindi state raggruppate in classi di altezza secondo la tabella 6 e sono state definite la categoria ed il tipo strutturale.

Quindi si è proceduto alla stima dell'altezza media di Lorey. Questa altezza pesa il contributo di ogni albero all'altezza media sulla base della loro area basimetrica secondo l'equazione:

$$H_{Lorey} = \frac{\sum_{i=1}^n g_i \times h_i}{\sum_{i=1}^n g_i}$$

in cui h_i e g_i sono rispettivamente l'altezza e l'area basimetrica della pianta i -esima. Questo metodo per il calcolo dell'altezza media è comunemente utilizzato negli Stati Uniti ed in Europa. L'altezza media di Lorey è più stabile di un'altezza media non ponderata ed è meno affetta dalla mortalità e dall'utilizzazione degli alberi più piccoli del popolamento.

La stima della biomassa totale epigea è stata effettuata usando la seguente relazione allometrica basata sul diametro ad 1.30 m (D):

$$M = a \times D^b$$

in cui M è la biomassa (kg) e a e b sono coefficienti. Data l'eteroschedasticità dei dati (Zar, 1999), l'equazione è generalmente espressa in scala logaritmica come:

$$\ln(M) = \ln(a) + b \times \ln(D)$$

Questa trasformazione, però, pur consentendo la determinazione dei due coefficienti per regressione lineare, introduce, nella successiva fase di ritrasformazione dei dati, un errore sistematico che richiede l'applicazione di un fattore di correzione calcolato attraverso l'errore standard (Sprugel, 1983). I valori dei coefficienti a e b sono generalmente stimati attraverso il campionamento di un certo numero di alberi modello (ad es. Alberti et al., 2005). Ciò determinerebbe una limitazione all'applicazione di questo modello a causa del fatto che a e b sono legati alle caratteristiche della specie e della stazione considerata. Tuttavia, poiché la biomassa è data dal prodotto tra densità e volume, vari autori (Niklas, 1994; Ketterings et al., 2001; Zianis e Mencuccini, 2004) hanno ipotizzato che il coefficiente a sia legato alla densità del legno σ , a sua volta dipendente dalle caratteristiche specifiche e stazionali. In tal senso Anfodillo et al. (2006), hanno verificato la possibilità di applicare un unico valore del coefficiente b e l'esistenza di una correlazione tra a e la densità media del legno. In particolare, questi autori hanno proposto l'applicazione di coefficienti in base alle dimensioni diametriche degli individui arborei considerati (Tabella 11).

Fase	Dimensioni diametriche	a	b
Fase giovanile	< 9.5 cm	$\ln(a) = -1.638$	2.08
Fase adulta	$9.5 < d < 17.5$ cm	$\ln(a) = -3.51 + 1.27 \sigma$	2.64
Fase matura	> 17.5 cm	$\ln(a) = -3.12 + 1.11 \sigma$	2.51

Tabella 11: valori dei coefficienti a e b dell'equazione 1 in funzione delle dimensioni diametriche delle piante (da Anfodillo et al., 2006, modificato)

Una volta calcolata la biomassa per ogni singola pianta, nota la superficie di rilievo, è stata calcolata la biomassa complessiva per punto inventariale in $t\ ha^{-1}$ ed lo stock di carbonio moltiplicando la biomassa per un contenuto di C pari a $0.5\ kgC\ kg^{-1}$.

Il confronto statistico tra dati strutturali rilevati a terra e dati determinati dal LiDAR è stato effettuato in due modi a seconda del tipo di attributi considerati:

- attributi qualitativi (carta bosco/non bosco; carta conifere/latifoglie; carta della struttura). In questo caso è stata utilizzata una tabella di contingenza (o tabella di errore matrice). Le intestazioni delle colonne rappresentano l'attributo qualitativo del bosco come determinato in campo e le intestazioni di righe rappresentano lo stesso attributo come individuato dal LiDAR. La diagonale indica il numero di punti valutati in campo che sono d'accordo con il rilievo LiDAR. Al contrario, le inesattezze di ogni unità di mappa sono descritti come entrambi gli errori di inclusione (in campo o errori di commissione) e gli errori di esclusione (del LiDAR o errori di omissione). Attraverso questa tabella, si può calcolare l'errore percentuale di commissione, o quanti poligoni per ogni unità di mappa sono stati erroneamente etichettati secondo le indagine sul campo. È anche possibile calcolare l'errore percentuale di omissione, o quanti poligoni per quel tipo sono stati lasciati dalla carta geografica.

Per quantificare il livello di concordanza tra dati rilevati in campo e dati stimati dal LiDAR è stato utilizzato il coefficiente Kappa di Cohen (Cohen, 1960). In termini generali, si tratta di un coefficiente statistico che rappresenta il grado di accuratezza e affidabilità in una classificazione statistica; è un indice di concordanza calcolato in base al rapporto tra l'accordo in eccesso e l'accordo massimo ottenibile.

$$\kappa = \frac{\Pr(a) - \Pr(e)}{1 - \Pr(e)}$$

in cui κ è il coefficiente Kappa di Cohen (< 1), $\Pr(a)$ rappresenta la proporzione dei dati concordanti tra dati a terra e LiDAR, $\Pr(e)$ è rappresenta la proporzione dei dati concordanti casualmente. Se $\kappa = 1$, allora la statistica rappresenta il caso ottimo.

Secondo Landis e Kock (1977), è possibile individuare le seguenti classi di concordanza tra dati misurati e stimati attraverso il coefficiente Kappa:

- | | |
|------------------|------------------------|
| 1. poca | $\kappa < 0$ |
| 2. scarsa | $0 < \kappa < 0.2$ |
| 3. debole | $0.21 < \kappa < 0.40$ |
| 4. moderata | $0.41 < \kappa < 0.61$ |
| 5. significativa | $0.61 < \kappa < 0.81$ |
| 6. ottima | $0.81 < \kappa < 1.00$ |

- attributi quantitativi (altezza media, altezza dominante e statura, densità del soprassuolo, distribuzione in classi di altezza, volume, biomassa e stock di carbonio). In questo caso, sono state utilizzate regressioni lineari o non lineari in Stata 7 (© Stata Corporation) oppure analisi della varianza (ANOVA)

b) Legno morto a terra

Il rilievo dimensionale del legno morto a terra ($d \geq 1.0$ cm) è effettuato all'interno dell'area di saggio lungo un transetto di 13 m (line intercept method, Harmon e Sexton, 1996) associando a ciascun elemento una classe di decadimento del legno (Tabella 12).

Classe di decadimento del legno	Descrizione
1	Individuo non decomposto
2	Individuo parzialmente decomposto
3	Individuo fortemente decomposto

Tabella 12: classi di decadimento del legno

Di ogni frammento di legno superiore a 1 cm di diametro intersecante il transetto è stato misurato il diametro e la classe di decomposizione. Il volume dei frammenti legnosi per ciascuna classe di decomposizione è stato stimato utilizzando l'equazione:

$$V_j = \sum_{i=1}^n 9.869 \frac{D_{ij}^2}{8L}$$

in cui V_j ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$) è il volume totale per la classe di decomposizione j , D_{ij} è il diametro del frammento i appartenente alla classe j in metri ed L è la lunghezza del transetto (26 m). Lo stock di carbonio, separatamente per classe di decomposizione, è quindi stato determinato secondo la relazione:

$$B_j = \frac{V_j \times \sigma \times C}{1000}$$

in cui B_j è lo stock di carbonio della classe di decomposizione j (tC ha^{-1}), V_j è il volume ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$), σ_j è la relativa densità basale (kg m^{-3}) desunta da precedenti studi (Alberti et al., 2007) e C è il contenuto di carbonio (%).

2.5 Rilievi vegetazionali e relative elaborazioni

All'interno di ogni area di saggio è stato effettuato un rilievo floristico-vegetazionale al fine di caratterizzare: tipi di vegetazione, composizione floristica e struttura della comunità vegetale indagata.

Il protocollo di rilievo, adattato alle esigenze progettuali, segue quanto proposto per l'analisi della vegetazione nel Programma Nazionale per il Controllo degli Ecosistemi Forestali (CON.ECO.FOR., Regolamento U.E. n. 1091/94).

I rilievi sono stati effettuati all'interno di quadrati di superficie pari a 100 m² (10 m x 10 m), il cui centro coincide con il punto centrale dell'area di saggio forestale. All'interno di ogni area sono state stimate:

- a) la copertura complessiva, della lettiera e del suolo nudo in percentuale, ove per copertura complessiva si intende la percentuale di suolo ricoperto dalla proiezione di tutte le parti vive funzionali (compresi foglie, tronchi e rami, incluse le plantule) di tutta la vegetazione.
- b) la copertura dei singoli strati in percentuale secondo il seguente schema:
 - arboreo (solo legnose, inclusi liane e rampicanti) > 5 m di altezza;
 - arbustivo (solo legnose, inclusi liane e rampicanti) > 0.5 m di altezza;
 - erbaceo (tutte le erbacee, le felci, e le specie legnose <0.5 m di altezza);
 - muscinale (briofite terricole e licheni terricoli).

Ove per copertura percentuale si intenda la percentuale di suolo ricoperto dalla proiezione di tutte le parti vive e funzionali (compresi foglie, tronchi e rami, incluse le plantule) di ogni singolo strato.
- c) la copertura specifica per ciascuno strato. La copertura è espressa in classe di copertura secondo la scala Braun-Blanquet (1928), modificata da Pignatti (1953). Le classi considerate sono riportate in Tabella 13:

Indice di copertura	Copertura (%)
r	rara
+	<1
1	1-20
2	21-40
3	41-60
4	61-80
5	81-100

Tabella 13: scala delle classi di copertura utilizzate ed intervalli percentuali

La nomenclatura floristica segue Poldini et al. (2001), mentre l'attribuzione fitosociologica delle specie è concorde con quanto proposto in letteratura per le cenosi vegetali censite (Marinček et al., 1989; Poldini & Nardini, 1993; Oberdorfer, 2001). L'attribuzione delle forme biologiche segue Pignatti (1982) e gli indici ecologici di Ellenberg (Ellenberg, 1974) sono stati assegnati secondo quanto proposto per la Flora italiana da Pignatti (2005).

Per consentire le elaborazioni statistiche i valori di copertura delle specie sono stati trasformati secondo quanto proposto da Van der Maarel (Westhoff & van der Maarel, 1978).

La caratterizzazione vegetazionale dei rilievi è stata effettuata mediante *cluster analysis*, con algoritmo di somiglianza *Similarity ratio* e metodo di aggregazione di *Ward*.

La biodiversità delle categorie strutturali è stata valutata attraverso l'indice di ricchezza floristica, corrispondente al numero di specie censite per area campione, e attraverso l'indice di diversità di Shannon (Shannon & Weaver, 1949).

La verifica di normalità dei gruppi confrontati è stata effettuata con test di normalità di Shapiro (*Shapiro test*, $p\text{-value} > 0.05$), l'omogeneità delle varianze di più gruppi con il test di Barlett (*Barlett test*, $p\text{-value} > 0.05$). Il confronto tra le medie delle categorie strutturali è stato effettuato con il test di analisi della varianza (ANOVA, $p\text{-value} < 0.05$) e con il post-hoc test - confronti multipli (*pairwise.t. test* con metodo Bonferroni). Dall'analisi sono stati esclusi i valori outlier dei punti di campionamento 11 e 13 (Tavola 6).

Le elaborazioni statistiche sono state effettuate con i software R R (R-Development Core Team, 2008), Microsoft ACCESS e Microsoft EXCEL.

2.6 Analisi della fragilità territoriale

2.6.1 Metodologia di analisi

Una porzione di territorio “fragile” è quella in cui, a fronte di una situazione intrinsecamente critica per quanto riguarda il verificarsi di eventi di piena o di dissesto, la vegetazione presente esercita un’azione determinante nel contenere tali fenomeni. La “fragilità” deriva proprio dalla consapevolezza che un eventuale danno alla copertura vegetale, o addirittura la sua asportazione, metterebbero a nudo quei fattori geomorfologici e litologici capaci di innescare, o incapaci di contenere, fenomeni di dissesto idrogeologico.

L’analisi del problema ha vissuto negli ultimi anni un notevole sviluppo grazie alla disponibilità sempre maggiore di strati informativi georiferiti (DTM, ortofoto, carte geologiche, carte tematiche, ecc.) e al continuo affinarsi dei modelli su base GIS.

Nel 2005 la Regione Friuli Venezia Giulia ha affidato al Dipartimento di Scienze Agrarie ed Ambientali dell’Università di Udine l’incarico di mettere a punto uno “*Studio per lo sviluppo di nuovi criteri tecnici e normativi per il riordino del Vincolo Idrogeologico*” (Cazorzi e Dalla Fontana, 2005).

Tale progetto ha visto l’applicazione sia a scala regionale che locale del software *Fragile!* (Cazorzi e Dalla Fontana, 2006), capace di definire quantitativamente il ruolo specifico che la vegetazione, nelle sue diverse forme, esercita sulla protezione del territorio in termini di stabilizzazione dei pendii e regimazione dei deflussi, in relazione al diverso peso che le componenti morfologiche, geologiche e climatiche assumono localmente e territorialmente. L’utilizzo di tale strumento consente una classificazione del territorio in base ad un parametro di “fragilità”, quantificando, punto per punto, la funzione attiva della vegetazione esistente sulla protezione del territorio.

Un punto di forza del metodo risulta essere la capacità di offrire risposte anche su larga scala a partire da una base informativa essenziale, che risulta essere costituita dal modello digitale del terreno (DTM), dalla carta dell’uso del suolo e della copertura vegetale, dalla carta geologica e dalla carta della pericolosità climatica (LSPP). Dalle quattro carte di base vengono derivate, con strumenti GIS standard, altre carte di sintesi quali ad esempio: pendenza, reticolo idrografico sintetico, divisione in unità idrografiche o territoriali, carta del CN (indicatore della propensione alla produzione di deflusso), ecc.

L’azione regimante sui deflussi e l’efficacia stabilizzante che contrasta l’erosione dei versanti vengono analizzate separatamente utilizzando diversi indici territoriali che mettono a confronto lo stato attuale rilevato sulla cartografia ed uno scenario che ipotizza l’assenza di copertura vegetale. Questi due aspetti vengono poi sintetizzati in indici territoriali specifici, rispettivamente il Fattore

Regimante della Vegetazione (FRV) e il Fattore Stabilizzante della Vegetazione (FSV); obiettivo finale è quello di ottenere una carta di sintesi del Fattore Protettivo della Vegetazione (FPV) espresso con un valore convenzionale adimensionale variabile da 0 a 100.

Il risultato finale può quindi essere messo a confronto con la cartografia tematica riferita al Vincolo Idrogeologico (R.D. 3267 del 1923) e con le informazioni reperibili nei Piani di Assetto Idrogeologico (L. 267/98 e L. 365/00).

In Figura 7 si riporta il diagramma di flusso descrittivo del metodo.

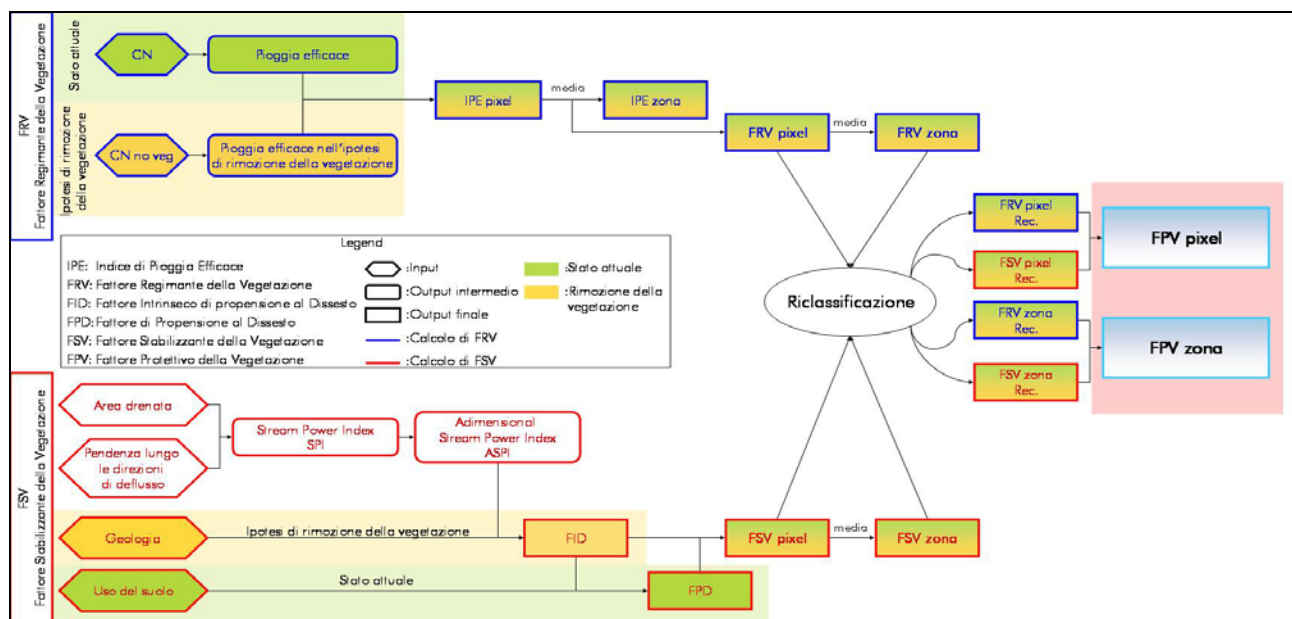


Figura 7: diagramma di flusso descrittivo di *Fragile!* (da Cazorzi et al., 2009).

2.6.2 Analisi applicata all'area di studio

Nell'ambito del progetto AliForMiDi è stata effettuata sull'area di studio della conca di Fusine un'analisi della fragilità territoriale sulla base dei dati LiDAR ad elevatissima risoluzione (DTM e uso del suolo, dimensione delle celle dei raster 1m x 1m). Tale analisi viene riportata nel presente lavoro (cap. 3.6) in comparazione con quella ottenuta nel 2008 con strumenti standard.

La base di dati su cui è stato condotto lo studio è costituita sia da documentazione ufficiale della Regione Friuli Venezia Giulia sia da risultati di altri studi. Di seguito si riportano i livelli informativi utilizzati.

- Modello digitale del terreno (DTM) ottenuto da dati LiDAR 1m x 1m;
- Carta di uso del suolo ricavata da dati LiDAR;
- Carte dei parametri delle Linee Segnalatrici di Probabilità Pluviometrica – LSPP (Borga et al., 2005);
- Carta geolitologica 1:150000 redatta da G.B. Carulli, rilasciata nel marzo 2007 dalla Direzione Centrale Ambiente e Lavori Pubblici, Servizio Geologico, Regione Friuli Venezia Giulia;
- Carta Tecnica Regionale 1:5000 e 1:10000, reperibile sul sito internet della Regione;

- f. Ortofoto ad alta risoluzione acquisite durante la campagna di rilievo LiDAR (ottobre 2006 e luglio 2009).

La carta di uso del suolo (punto *b* del precedente elenco) è stata ottenuta dalla combinazione delle cartografie dei tipi strutturali, delle superfici boscate e delle formazioni conifere-latifoglie (Tavole 1, 2 e 3).

Nella procedura di realizzazione della carta di uso del suolo si è provveduto ad un preliminare accorpamento dei tipi strutturali sulla base della tipologia di struttura forestale derivata (vedasi Tabella 7). La classe *Perticaia 3* è stata accorpata nella classe *Fustaia*, mentre le classi *Biplano* e *Multiplano* sono state categorizzate sulla base del parametro H_{AVG} (altezza media della particella) sulla base dei criteri riportati in Tabella 7, e assegnate quindi alle 4 classi strutturali (*Novelletto*, *Spessina*, *Perticaia*, *Fustaia*).

La procedura di analisi della fragilità territoriale sull'area di studio è stata messa a confronto con quella realizzata nel 2008 a scala regionale (Cazorzi e Mercì, 2008), in cui la risoluzione dei dati raster è pari a 40 m e il tematismo riferito all'uso del suolo è la Carta Natura (1:50000) prodotta dall'APAT nel 2004.

In Figura 8 si riportano i DTM utilizzati nel presente studio (a) e nello studio del 2008 (b).

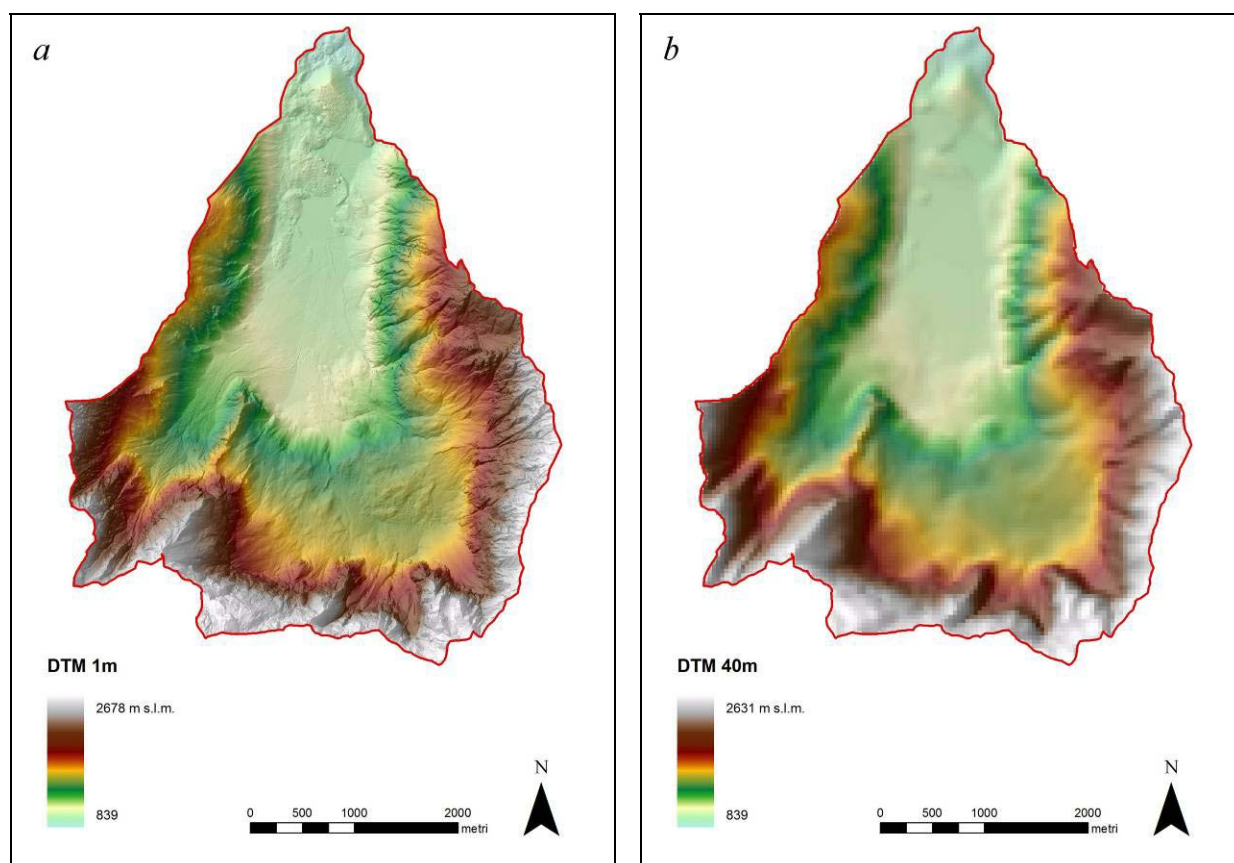


Figura 8: modello digitale del terreno (DTM) alla risoluzione di 1 m ottenuto da dati LiDAR (a) e alla risoluzione di 40 m utilizzato nello studio del 2008 (b).

È interessante osservare come le cartografie relative all'uso del suolo, riportate in Figura 9, siano profondamente differenti per quello che riguarda la copertura della parte centrale dell'area di studio.

L'analisi dei dati LiDAR ha individuato una copertura prevalente a conifere, mentre la Carta Natura riporta una copertura a latifoglie.

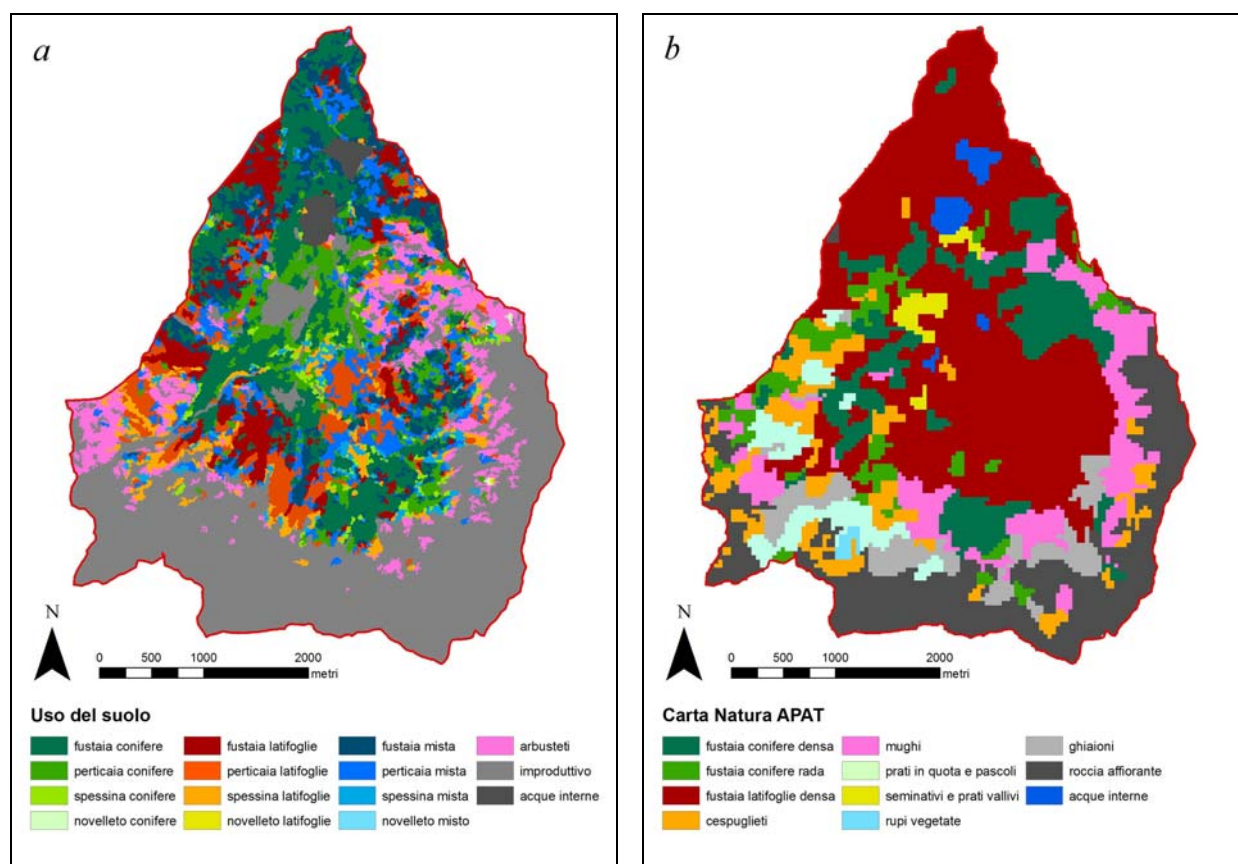


Figura 9: carta di Uso del suolo ricavata dall'analisi dei dati LiDAR (a) e Uso del suolo derivato dalla Carta Natura APAT (b).

Per i calcoli preliminari alla mappatura della fragilità territoriale, il metodo di riferimento nel calcolo della produzione di deflusso è quello dell'indicatore idrologico CN (*Curve Number*) elaborato dal *Soil Conservation Service* negli USA. Esso esprime, su una scala 0-100, l'attitudine di una certa combinazione suolo-soprasuolo nel produrre deflussi superficiali. Le aree con CN elevato sono quelle nelle quali è maggiore la propensione alla produzione di deflusso superficiale, da cui consegue una maggiore probabilità di innesco dei fenomeni erosivi. I valori di CN assegnati alle combinazioni sono riportati nella Tabella 14:. La categoria di uso del suolo *Vegetazione neutralizzata* è relativa allo scenario di calcolo che ipotizza l'assenza di vegetazione.

Nell'ambito del presente progetto è stata inoltre affinata la calibrazione del ruolo dei diversi tipi di vegetazione nel consolidare i versanti mediante gli apparati radicali, attraverso ricerche bibliografiche e rilievi in campo.

In Tabella 15: si riportano i Fattori di Efficacia (EF, su una scala di riferimento teorica 0-100) dell'effetto stabilizzante della vegetazione utilizzati nelle diverse analisi della fragilità territoriale condotte. La diversità riscontrabile in alcuni valori EF per analoghe categorie va attribuita agli esiti di una approfondita e specifica ricerca a scala regionale (Blasone, 2010).

Uso del suolo	Classe di permeabilità			
	A	B	C	D
Fustaia conifere	22	25	35	39
Perticaia conifere	36	40	47	52
Spessina conifere	43	47	53	58
Novelletto conifere	46	50	56	61
Fustaia latifoglie	30	34	40	45
Perticaia latifoglie	45	48	54	59
Spessina latifoglie	48	51	57	62
Novelletto latifoglie	50	53	59	64
Fustaia mista	26	29	37	42
Perticaia mista	36	40	47	52
Spessina mista	43	47	53	58
Novelletto misto	46	50	56	61
Arbusteti	52	55	61	66
Improduttivo	75	77	84	86
Acque interne	100	100	100	100
<i>Vegetazione neutralizzata</i>	75	77	84	86

Tabella 14: valori di CN per l'area di studio.

Uso del suolo (2011)	EF	Carta Natura APAT (2008)	EF
Fustaia conifere	28	Fustaia conifere densa	40
Perticaia conifere	23	Fustaia conifere rada	35
Spessina conifere	18	Fustaia latifoglie densa	40
Novelletto conifere	15	Cespuglieti	15
Fustaia latifoglie	40	Mughi	20
Perticaia latifoglie	33	Prati in quota e pascoli	10
Spessina latifoglie	28	Seminativi e prati vallivi	10
Novelletto latifoglie	20	Rupi vegetate	20
Fustaia mista	38	Ghiaioni	0
Perticaia mista	31	Roccia affiorante	0
Spessina mista	23	Acque interne	0
Novelletto misto	18		
Arbusteti	12		
Improduttivo	0		
Acque interne	0		

Tabella 15: fattori di Efficacia (EF) dell'effetto stabilizzante della vegetazione utilizzati in *Fragile!*

3. RISULTATI E DISCUSSIONE

3.1 Validazione della carta delle aree boscate e non boscate derivata da dati LiDAR

La validazione della carta delle aree boscate e non boscate derivata da dati LiDAR (Tavola 1) è stata effettuata utilizzando la griglia di punti 100 x 100 m precedentemente elaborata attraverso un confronto con la carta d'uso del suolo Moland e verifica manuale su ortofoto nei punti in cui le due classificazioni erano diverse per eliminare eventuali problemi di scala o di interpretazione. In totale sono stati considerati 1694 punti. L'accuratezza della carta è del 97% (1638 punti corrispondenti su 1684 considerati) ed il K-Cohen è pari a 94%. Secondo la classificazione di Landis e Kock (1977), vi è quindi un ottimo accordo tra carta delle aree boscate e non boscate ed i rilievi a terra (Tabella 16).

		Field plots				
		Suolo nudo	Bosco	arbusteto	Campione	Errore di commissione
LIDAR map	suolo nudo	603	5	23	631	-
	bosco	2	917	9	928	99%
	arbusteto	12	5	118	135	87%
	Samples	617	927	150		
	Correct	603	917	118		
	Omission Error	-	99%	79%		
Totale campione		1694				
Totale corretti		1638				
Accuratezza		97%				
P chance		47%				
K-Cohen		94%				

Tabella 16: tabella di contingenza e calcolo del coefficiente K-Cohen per la validazione della bosco non bosco.

3.2 Validazione della carta conifere-latifoglie derivata da dati LiDAR

Per la classificazione dei soprassuoli in conifere, latifoglie o misto si sono usate le soglie riportate in Tabella 17 e sono state considerate tutte le piante rilevate con diametro maggiore di 4.5 cm.

Categoria tipologica	Soglia
conifere	Presenza di conifere > 65%
latifoglie	Presenza di latifoglie > 65%
misto	Presenza né conifere né latifoglie > 65%

Tabella 17: soglie per la classificazione dei soprassuoli in conifere, latifoglie e misto

La validazione della carta derivata dal LiDAR (Tavola 2) è stata effettuata utilizzando una tabella di contingenza (Tabella 18). Nella tabella sono stati riportati nelle righe e nelle colonne i numeri corrispondenti ad una particolare categoria tipologica LiDAR rispetto alla composizione del bosco reale da verifica in campo. La diagonale evidenzia il numero di punti valutati in campo che sono d'accordo con la categoria tipologica riportata dalla mappa. Tali numeri sulla diagonale indicano quanto bene l'unità di mappa è stata interpretata e quanta fiducia ci può essere nel suo uso. I numeri "fuori diagonale" indicano le carenze della mappa (per esempio, quando le categorie sono state confuse) e quali categorie sono state sotto- o sovra-rappresentate.

		Field plots				
		conifere	latifoglie	misto	Campione	Errore di commissione
LIDAR map	conifere	11	3		14	-
	latifoglie		11		11	100%
	misto		7	5	12	42%
	Samples	11	21	5		
	Correct	11	11	5		
	Omission Error	-	52%	100%		
	Totale campione	37				
	Totale corretti	27				
	Accuratezza	73%				
	P chance	33%				
	K-Cohen	60%				

Tabella 18: tabella di contingenza e calcolo del coefficiente K-Cohen per la validazione della carta delle categorie tipologiche (bosco di conifere; bosco di latifoglie; bosco misto). Per la classificazione dei soprassuoli a terra sono state considerate tutte le piante con diametro maggiore di 4.5 cm.

Complessivamente, è stata calcolata un'accuratezza pari al 73% (27 punti su 32 campionati hanno visto una corrispondenza con quanto riportato dalla mappa). In termini di validazione, il coefficiente Kappa di Cohen è pari al 60%. Secondo la classificazione di Landis e Kock (1977), vi è quindi un moderato accordo tra carta della struttura e rilievi a terra. Le maggiori discordanze sono state rilevate soprattutto nel caso del bosco di conifere e nel bosco misto, mentre, invece, i boschi di latifoglie sono stati sempre classificati come tali dai dati LiDAR.

Il confronto tra dati LiDAR e dati rilevati a terra non migliora (accuratezza = 70%; kappa Cohen = 58%) se si considerano solo le piante con diametro maggiore di 12.5 cm.

La maggiore difficoltà nell'identificare i boschi di conifere ed il bosco misto sono probabilmente legati alla densità di rilievo dei dati LiDAR (2.8 punti m⁻²) ed alla tipologia del rilievo stesso (4 echi di ritorno) che non hanno consentito di caratterizzare in modo appropriato i piani dominati. Infatti, i punti per i quali la classificazione LiDAR non è coincisa con il rilievo a terra, sono boschi multiplani o perticaie dove nel piano dominato era presente una rilevante quota di piante di faggio, se il piano dominante era di abete rosso, o di abete, se il piano dominante era di faggio.

La distribuzione delle diverse tipologie di bosco nelle categorie strutturali sulla base dei rilievi a terra è riportata in

Tabella 19.

	conifere	latifoglie	misto
spessina	50%	50%	0%
perticaia	0%	86%	14%
fustaia adulta	14%	57%	29%
fustaia matura	100%	0%	0%
multiplano	50%	40%	10%

Tabella 19: distribuzione dei punti rilevati a terra nelle diverse categorie strutturali e tipologiche. Per la classificazione dei soprassuoli a terra sono state considerate tutte le piante con diametro maggiore di 4.5 cm.

3.3 Validazione della carta della struttura derivata da dati LiDAR

Dall'analisi della carta delle strutture elaborata partendo dai dati LiDAR (Tavola 3) appare evidente un netta prevalenza del bosco coetaneo (66%) rispetto a quello multistratificato e disetaneo (20%). In particolare, la fase a fustaia coetaneiforme monoplana, sia essa adulta o matura, è quella nettamente prevalente (33%). Tuttavia, se si considerano le categorie strutturali separatamente, quella maggiormente rappresentata in termini di superficie è la perticaia (21%), mentre il novelletto è quello meno presente (<1%) (Tabella 20). La scarsa presenza di novelletti è in parte legata alle difficoltà di separazione in fase di elaborazione dei dati LiDAR tra questo tipo strutturale e l'arbusteto, ma anche dalla particolare forma di trattamento applicata nell'area di studio a carico delle fustaie soprattutto se si tratta di piceo-faggeti montani: i tagli successivi a gruppi. In questo caso, l'esecuzione del taglio di sementazione determina spesso la presenza di strutture biplane con il piano dominante rappresentato dalle piante del vecchio ciclo e con il piano dominato rappresentato dalla nuova generazione. Sebbene la categoria "bosco biplano" sia poco rappresentata (2%), quanto detto in precedenza è meglio evidenziato se si considerano i tipi strutturali separatamente anziché aggregarli a livello di categoria. Infatti, è possibile notare una notevole presenza di "perticaia2" e di "perticaia3" cioè di soprassuoli in cui non è stato effettuato il completamento dello sgombero delle piante del vecchio ciclo, anche se il novellame è ormai affermato (Tabella 7). Come si dirà in seguito, ciò può rappresentare un limite nel confronto tra dati LiDAR e dati rilevati a terra.

Categoria strutturale	Tipo strutturale	Superficie (ha)	%	%
Arbusteto	arbusteto	127.9	12.0%	12.0%
Novelletto	novelletto1	0.0	0%	0.2%
	novelletto2	1.8	0.2%	
Spessina	spessina1	45.4	4.0%	11.0%
	spessina2	74.7	7.0%	
Perticaia	perticaia1	60.1	6.0%	21.0%
	perticaia2	152.5	14.0%	
	perticaia3	10.6	1.0%	
Fustaia adulta	fustaia adulta	168.9	16.0%	16.0%
Fustaia matura	fustaia matura	180.3	17.0%	17.0%
Biplano	Biplano	22.8	2.0%	2.0%
Multiplano	multiplano	207.3	20.0%	20.0%
TOTALE		1052.3		

Tabella 20: distribuzione delle superfici per tipo strutturale come individuati nella carta della strutture derivata da dati LiDAR.

Come ricordato nei materiali e metodi, i 37 punti di rilievo a terra sono stati ripartiti in modo stratificato tra i diversi tipi strutturali. Sulla base dei dati rilevati, è stato possibile costruire le curve ipsometriche per le principali specie costituenti i popolamenti (Figura 10). Tutte le curve ipsometriche sono statisticamente significative ($P < 0.05$).

Sulla base delle curve ipsometriche, è stata determinata l'altezza delle singole piante noto il diametro ad 1.30 m e si è proceduto alla classificazione dei punti inventariali per categoria e tipo strutturale secondo i criteri riportati in Tabella 7.

In questa sede, per consentire un più facile confronto tra dati LiDAR e dati a terra, si è deciso di esporre la maggior parte dei risultati a livello di categoria e di scendere a livello di tipo solo in alcuni casi per analisi di maggior dettaglio.

Le principali caratteristiche dendrometriche derivate con i rilievi a terra sono riportati in Tabella 21.

Categoria strutturale	Densità (n ha ⁻¹)		G (m ² ha ⁻¹)		H _{Lorey} (m)	H _d ² o S ³ (m)
	<i>totale</i>	<i>d > 12.5 cm</i>	<i>totale</i>	<i>d > 12.5 cm</i>		
spessina	2746±1761	386±9	23.0±4.4	12.8±1.8	15.5±3.4	22.3±1.3
perticaia	2246±286	689±91	36.4±3.7	27.8±4.8	18.4±1.3	24.2±1.2
fustaia adulta	691±101	656±93	45.3±5.2	45.1±5.2	24.6±0.7	28.5±0.8
fustaia matura	537±88	471±69	63.9±5.1	63.4±5.3	30.7±1.1	34.3±0.9
multiplano	1014±169	569±86	43.0±5.1	40.4±4.9	25.1±1.1	34.2±1.2

Tabella 21: principali caratteristiche dendrometriche delle area di saggio realizzate a terra per categoria strutturale (media ± errore standard). G: area basimetrica; H_{Lorey}: altezza media di Lorey riferita all'intero popolamento; H_d: altezza dominante; S: statura.

² Nel caso di popolamenti coetaneiformi, l'altezza dominante è l'altezza media delle cento piante di maggiori dimensioni diametriche ad ettaro, ossia delle cinque piante di maggiori dimensioni diametriche all'interno dell'area di saggio di 531 m².

³ Nel caso di un popolamento multiplano o multistratificato, la statura è stata calcolata come altezza media delle 2-3 piante più alte ad ettaro, ossia come altezza massima all'interno dell'area di saggio di 531 m².

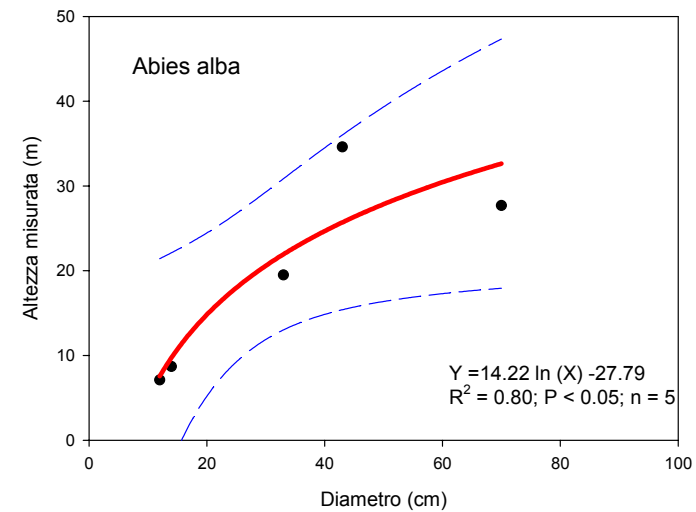
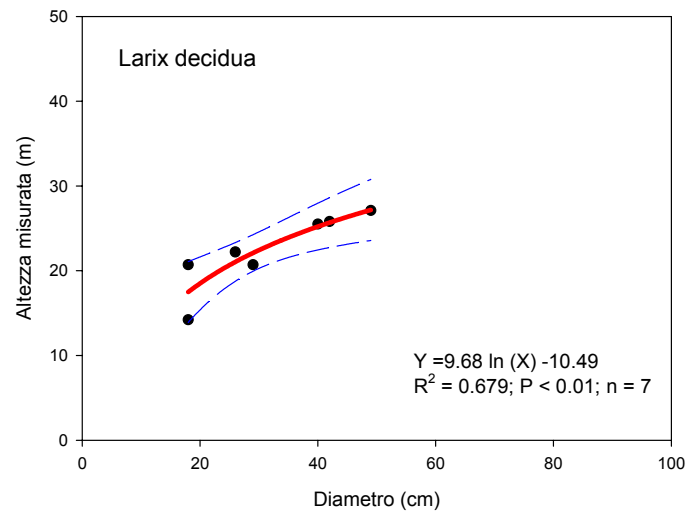
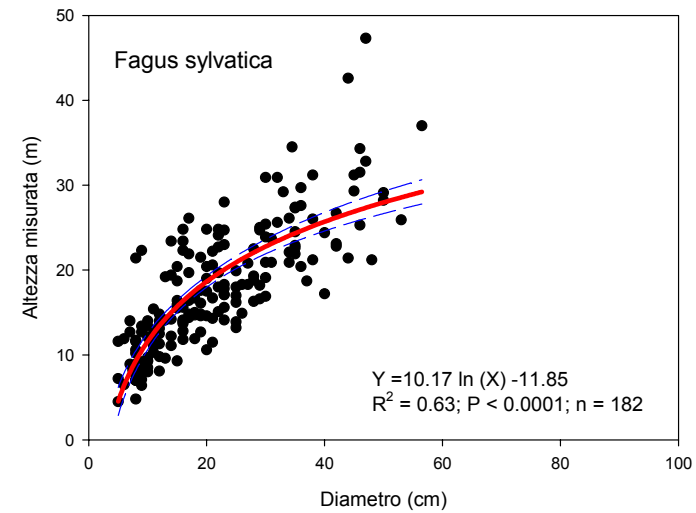
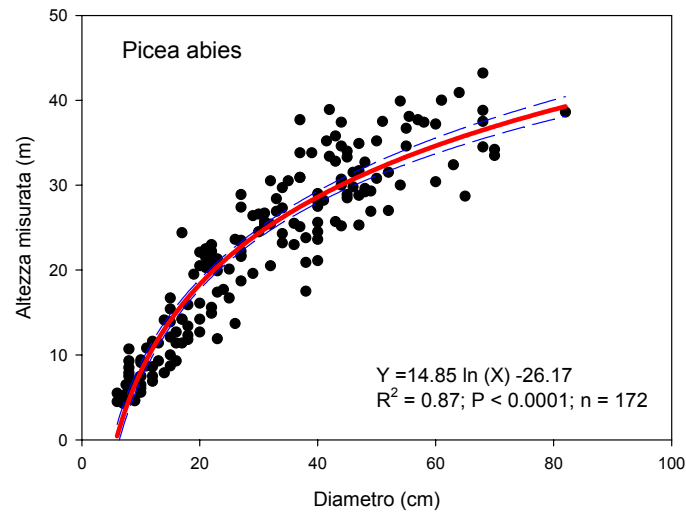


Figura 10: curve ipsometriche (in rosso) derivate dai dati misurati nelle 37 aree di saggio per le quattro specie principali (*Picea abies*, *Fagus sylvatica*, *Larix decidua* e *Abies alba*). Le linee blu tratteggiate indicano gli intervalli di confidenza al 95%. Le equazioni e le statistiche per ciascuna specie sono riportate nel relativo riquadro.

Confrontando la carta della struttura con i rilievi a terra, è stata innanzitutto verificata una correlazione altamente significativa ($R^2 = 0.64$; $P < 0.001$) tra altezza media derivata da dati LiDAR ed altezza media di Lorey per l'intero popolamento (piante con $d > 4.5$ cm; Figura 11). In questo caso, però, il LiDAR sottostima mediamente l'altezza media del popolamento del 14% probabilmente a causa della difficoltà nell'individuare le piante dominate con diametro più piccolo. Ciò è primariamente da imputare alla bassa densità del rilievo LiDAR (2.8 punti m^{-2}) che può essere sufficiente nel caso di fustaie adulte o mature, ma sicuramente è insufficiente nel caso di spessine e giovani perticaie dove le densità rilevate ad ettaro sono superiori alle 2000 piante ha^{-1} . Tuttavia, se si considerano le sole piante con $d > 12.5$ cm (Figura 12), vi è una perfetta corrispondenza tra altezza media LiDAR ed altezza media di Lorey (pendenza della retta = 1; intercetta non significativamente diversa da zero).

Per lo stesso motivo ricordato in precedenza, non è stata verificata alcuna correlazione significativa tra densità media del popolamento stimata da dati LiDAR e densità rilevata (dati non riportati). Tuttavia, se si considerano solo i punti classificati come fustaia adulta o come fustaia matura sia a terra che sulla carta della struttura, la correlazione tra la densità delle piante con $d > 12.5$ cm rilevata dal LiDAR e quella rilevata a terra è significativa ($P < 0.01$) anche se, nuovamente, il LiDAR tende a sottostimare la densità (Figura 13).

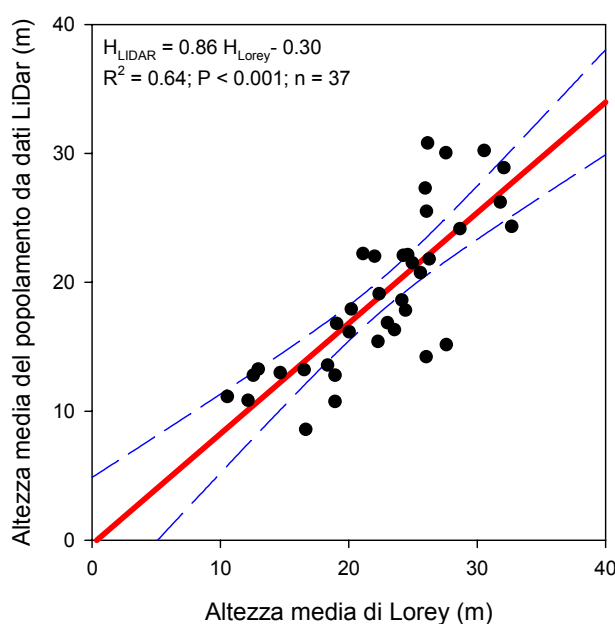


Figura 11: confronto tra altezza media derivata da dati LiDAR ed altezza media di Lorey per l'intero popolamento (piante con $d > 4.5$ cm). La linea rossa indica la regressione la cui equazione è riportata in figura. L'intercetta non è significativamente diversa da zero ($p=0.90$). Le linee blu tratteggiate indicano gli intervalli di confidenza al 95%.

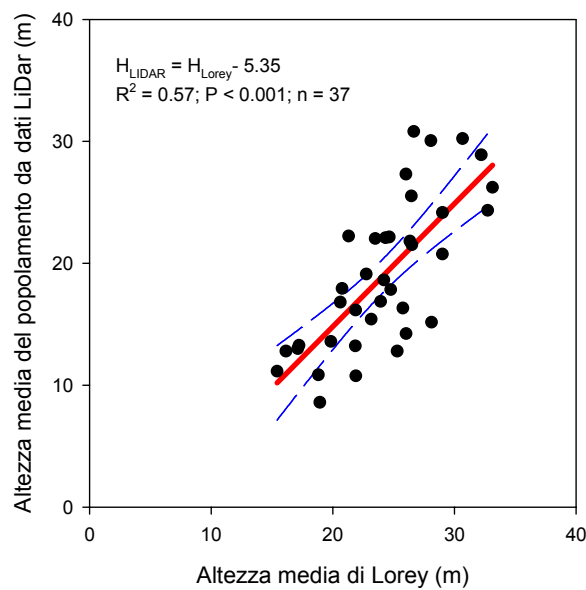


Figura 12: confronto tra altezza media derivata da dati LiDAR ed altezza media di Lorey per le sole piante con $d > 12.5$ cm. La linea rossa indica la regressione la cui equazione è riportata in figura. L'intercetta non è significativamente diversa da zero ($p=0.16$). Le linee blu tratteggiate indicano gli intervalli di confidenza al 95%.

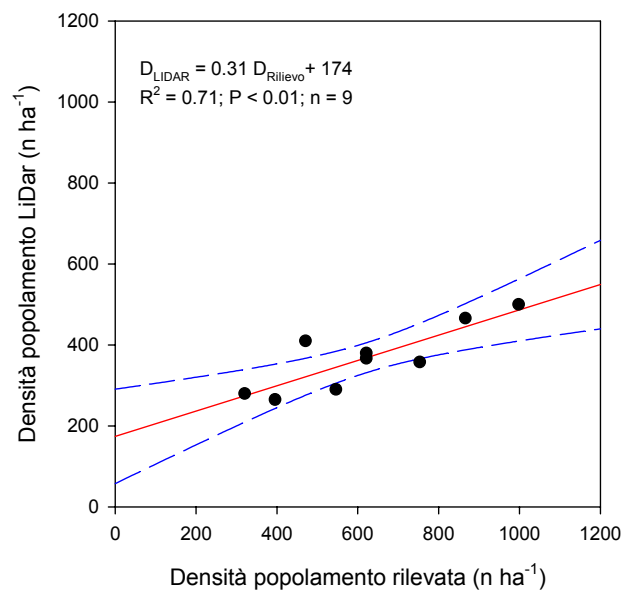


Figura 13: confronto tra densità del popolamento derivata da dati LiDAR ed densità del popolamento rilevata a terra per le sole fustaie adulte o mature e per le piante con $d > 12.5$ cm. La linea rossa indica la regressione la cui equazione è riportata in figura. Le linee blu tratteggiate indicano gli intervalli di confidenza al 95%.

Per validare la carta della struttura è stata utilizzata una tabella di contingenza (Tabella 22). Nella tabella sono stati riportati nelle righe e nelle colonne i numeri corrispondenti ad una particolare categoria strutturale LiDAR rispetto alla struttura del bosco reale da verifica in campo. La diagonale evidenziata indica il numero di punti valutati in campo che sono d'accordo con la categoria strutturale riportata dalla mappa. Al contrario, le inesattezze di ogni unità di mappa sono descritti con gli errori di inclusione (a terra) e gli errori di esclusione (carta della struttura). Infatti, attraverso

la lettura delle righe si può calcolare l'errore percentuale di commissione, ossia quanti poligoni per ogni unità di mappa sono stati erroneamente etichettati secondo le indagine sul campo; leggendo invece le colonne si può calcolare l'errore percentuale di omissione, ossia quanti poligoni per una categoria non sono stati classificati correttamente dalla mappa. Quindi, i numeri sulla diagonale indicano quanto bene l'unità di mappa è stata interpretata e quanta fiducia ci può essere nel suo uso. I numeri "fuori diagonale" indicano le carenze della mappa (per esempio, quando le categorie sono state confuse) e quali categorie sono state sotto- o sovra-rappresentate.

Complessivamente, è stata calcolata un'accuratezza pari al 68% (25 punti su 32 campionati hanno visto una corrispondenza con quanto riportato dalla mappa). In termini di validazione, il coefficiente Kappa di Cohen è pari al 58%. Secondo la classificazione di Landis e Kock (1977), vi è quindi un moderato accordo tra carta della struttura e rilievi a terra. Le maggiori discordanze sono state rilevate soprattutto per perticaia e bosco multiplano, mentre il maggior accordo è stato riscontrato per fustaia adulta e fustaia matura. Nuovamente, ciò può essere imputato all'elevata densità dei popolamenti nelle fasi giovanili (spessina e perticaia) ed alla bassa densità del rilievo LiDAR che non ha consentito di ben individuare gli eventuali piani dominati al di sotto delle piante del vecchio ciclo.

		Rilievi a terra							Errore di commissione
		novelletto	spessina	perticaia	fustaia adulta	fustaia matura	multiplano	Campione	
Mappa della struttura LiDar	novelletto							0	-
	spessina		2	2	1			5	40%
	perticaia			8	1			9	89%
	fustaia adulta			2	4		1	7	57%
	fustaia matura				1	4	2	7	57%
	multiplano			2			7	9	78%
	Campione	0	2	14	7	4	10		
	Corretto	0	2	8	4	4	7		
	Errore di omissione	-	100%	57%	57%	100%	70%		
Campione totale		37							
Totale corretti		25							
Accuratezza complessiva		68%							
P chance		22%							
K - Cohen		58%							

Tabella 22: tabella di contingenza e calcolo del coefficiente K-Cohen per la validazione della carta della struttura

Se si considerano i 25 punti per i quali si è verificata una perfetta corrispondenza tra classificazione a terra e classificazione della mappa della struttura, è possibile identificare la distribuzione delle piante nelle diverse classi di altezza e confrontare i rilievi a terra con la mappa (Figura 14).

Nella perticaia, la maggior parte delle piante si colloca nella classe 10-20 cm. Per questa categoria strutturale non è stata trovata alcuna differenza significativa per classe di altezza tra rilievo LiDAR e rilievo a terra ($P > 0.05$) se si eccettua la classe 10-20 m dove il numero di piante nel rilievo a terra è significativamente maggiore rispetto al rilievo LiDAR ($P < 0.001$).

Nella fustaia adulta, la classe di altezza più rappresentata è la classe 20-25 m. In questo caso, non è stata riscontrata alcuna differenza significativa per classe di altezza tra rilievo LiDAR e rilievo a terra ($P > 0.05$).

Nella fustaia matura, la classe di altezza più rappresentata è la classe > 25 m. In questo caso, è stata riscontrata una differenza significativa tra rilievo LiDAR e rilievo a terra per la classe 10-20 m e > 25 m ($P < 0.001$).

Nel bosco multiplano, non c'è alcuna classe prevalente e la distribuzione delle piante nelle diverse classi di altezza ha una buona corrispondenza tra rilievo LiDAR e rilievo a terra ($P > 0.05$).

Se si considerano i punti per i quali non è stata trovata una corrispondenza tra rilievo a terra e mappa della struttura, gli errori più comuni sono due: 1) multiplano per il LiDAR = perticaia per il rilievo a terra; 2) fustaia matura per il LiDAR = multiplano per il rilievo a terra. Nel primo caso, l'errore di classificazione è legato all'impossibilità del LiDAR di rilevare correttamente le piante dominate. Nel secondo, caso, invece, la discrepanza potrebbe essere legata alla dimensione dell'area di saggio a terra che non ha consentito di individuare piante del vecchio ciclo ancora presenti (Figura 15). Tale errore potrebbe anche essere legato al fatto che il volo LiDAR si riferisce al 2006-2009, mentre i rilievi sono stati effettuati nel 2010-2011 e quindi le piante del vecchio ciclo potrebbero già essere state sgomberate nel frattempo. Da qui la necessità di avere la contemporaneità tra dati LiDAR e verifiche a terra per poter ottenere una carta della struttura ancora più affidabile di quella realizzata nel presente studio.

Va inoltre evidenziato che, per sua natura, la carta delle strutture derivata da LiDAR riporta la stima dei valori medi di altezza e di densità del popolamento calcolati a partire dai singoli alberi rilevati in fase di pre-processamento. Questi parametri possono variare notevolmente all'interno del poligono strutturale omogeneo a cui si riferiscono. La dimensione stessa del poligono ($> 2000 \text{ m}^2$) è essa stessa variabile potendo coprire, in funzione del dataset, superfici molto grandi (dell'ordine delle decine o centinaia di migliaia di m^2). Pertanto, oltre ai fattori di criticità sopra esplicitati derivanti dalla tipologia di rilievo LiDAR e dal tipo di elaborazione effettuato, le discrepanze tra valori riportati in cartografia e quelli misurati a terra all'interno del singolo plot possono essere anche legate ai seguenti fattori:

- errore nel posizionamento dell'area di saggio dovuto al GPS (fattore critico per quanto riguarda i rilievi sotto chioma);
- il tipo di campionamento stratificato utilizzato per le analisi non consente di valutare la variabilità della distribuzione degli alberi e delle relative altezze all'interno del poligono strutturale omogeneo.

Tale considerazioni possono essere applicata anche all'analisi della cartografia della copertura forestale prevalente (latifoglie/conifere/misto) dove la variabile da considerare è la specie e non la densità e l'altezza degli alberi.

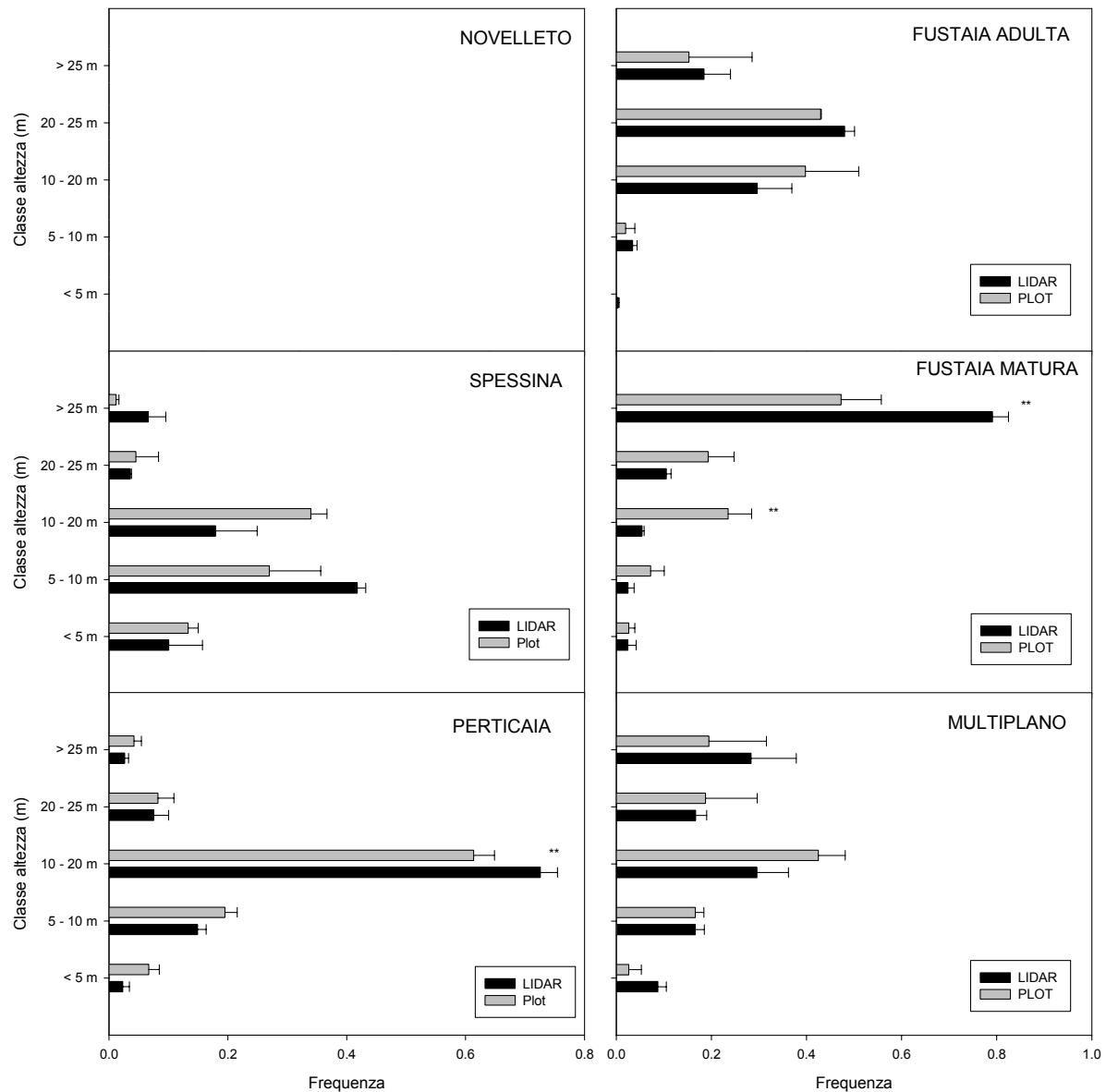


Figura 14: distribuzione delle piante in classi di altezza per le diverse categorie strutturali (novelletto, spessina, perticaia, fustaia adulta, fustaia matura e multiplano). Sono stati considerati solo i 25 punti sui 37 campionati per i quali la classificazione a terra coincide con quella del LiDAR. Nella categoria multiplano sono stati inclusi anche i punti classificati dal LiDAR come biplano. Le barre orizzontali indicano l'errore standard della media. Gli asterischi indicano una differenza significativa ($P < 0.001$) tra rilievo LiDAR e rilievo a terra per una classe di altezza.

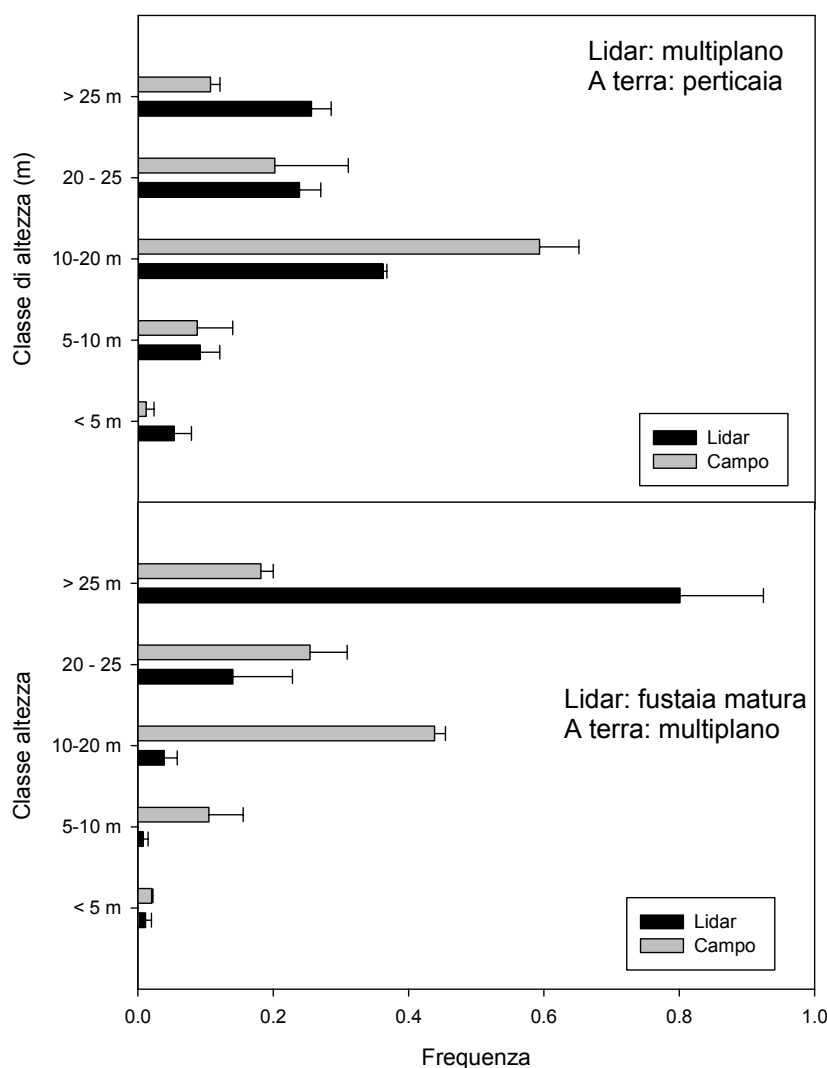


Figura 15: distribuzione delle piante in classi di altezza per punti per i quali la classificazione in campo (grigio) non corrispondeva con quella del LiDAR (nero). Le barre indicano l'errore standard della media.

3.4 Stima della provvigione e degli stock di carbonio da dati LiDAR

Sulla base delle curve ipsometriche precedentemente descritte, si è proceduto innanzitutto al confronto con le curve ipsometriche delle tariffe del sistema di tavole dendrometriche regionali (Del Favero et al., 2000) per scegliere la tavola più appropriata separatamente per ogni specie considerata (Figura 16).

In base a questo confronto, sono state scelte la tariffa n. II per l'abete rosso, la tariffa n. II per il faggio, la tariffa n. II per il larice e la tariffa n. II per l'abete bianco. Per le specie minoritarie, si è deciso di cubare le latifoglie usando la tariffa del faggio e le conifere usando la tariffa dell'abete rosso.

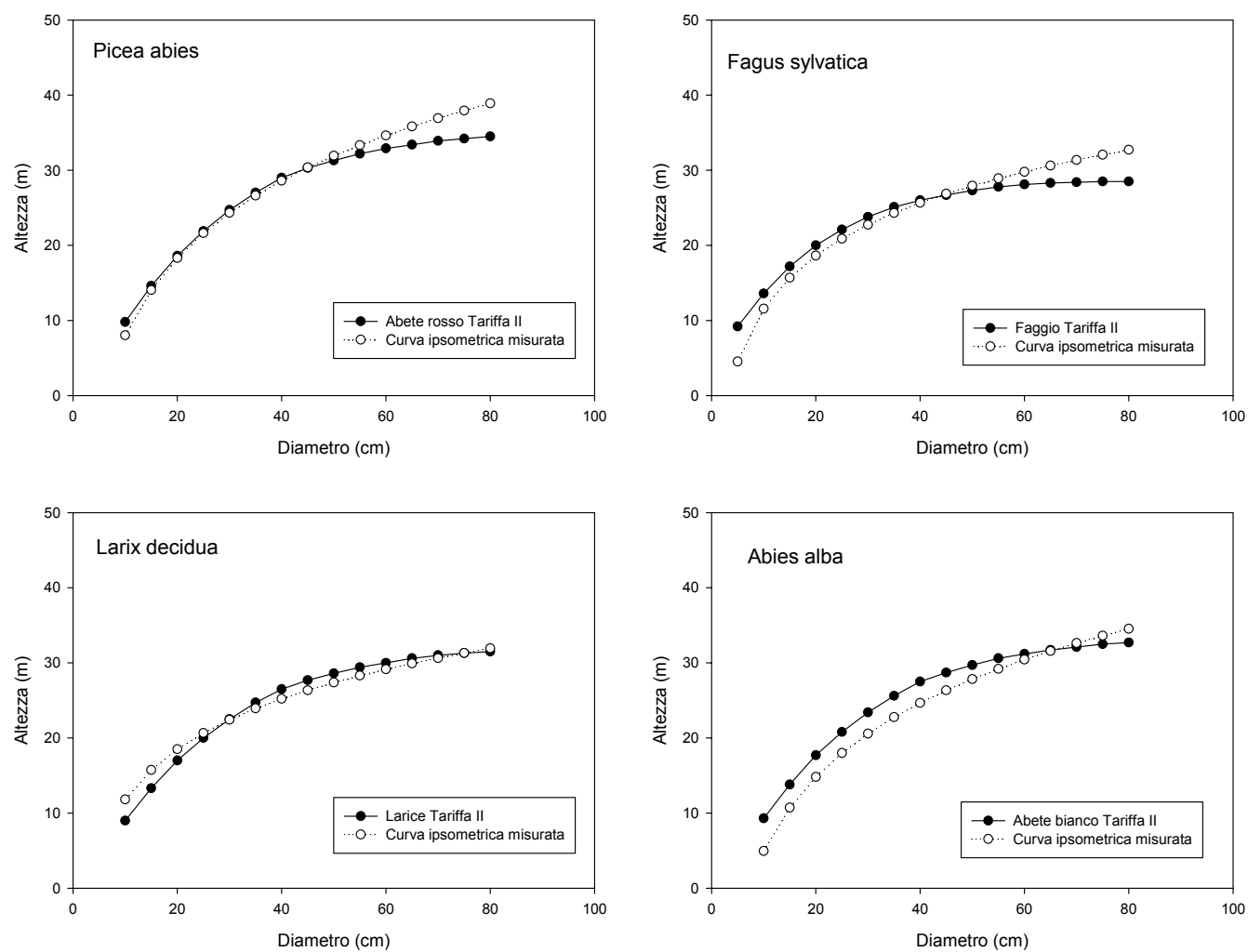


Figura 16: confronto tra le curve ipsometriche reali e le curve ipsometriche delle tariffe di cubatura prescelte per il calcolo del volume per le quattro specie principali dell'area di studio (*Picea abies*, *Fagus sylvatica*, *Larix decidua* e *Abies alba*).

Mediamente la provvigione totale unitaria ad ettaro rilevata nelle 37 aree di saggio è pari a $509 \pm 37 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, mentre la provvigione unitaria ad ettaro per le sole piante con diametro maggiore di 12.5 cm è pari a $469 \pm 42 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$.

Considerando le classi strutturali rilevate a terra, la classe con maggiore provvigione è la fustaia matura (altezza dominante = $34.3 \pm 0.9 \text{ m}$) seguita dalla fustaia adulta (altezza dominante = 28.5 ± 0.8) e dal bosco multiplano (statura = 34.2 ± 1.2). La spessina è, invece, la classe con la minor provvigione totale unitaria ($201 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) e minor provvigione unitaria per le piante con diametro superiore a 12.5 cm ($122 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) (Tabella 23).

Categoria strutturale	V ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$)	
	<i>totale</i>	<i>d > 12.5 cm</i>
spessina	201±27	122±6
perticaia	419±49	342±15
fustaia adulta	589±63	587±13
fustaia matura	805±83	801±13
multiplano	521±75	503±15

Tabella 23: provvigione totale unitaria e per le piante con diametro maggiore a 12.5 cm per categoria strutturale rilevata a terra. Media \pm errore standard.

Precedenti studi in ambiente alpino (Tonolli et al., 2011a; Tonolli et al., 2011b) hanno dimostrato come il volume del soprassuolo sia spesso correlato all'altezza media derivata da dati LiDAR. Il modello d'interpolazione prescelto è stato una relazione di tipo potenza (Saatchi et al., 2011):

$$V = a \times H_{\text{LiDAR}}^b$$

in cui V è la provvigione unitaria, H_{LiDAR} è l'altezza media del LiDAR ed a e b sono coefficienti. Nella nostra area di studio, la provvigione totale unitaria è significativamente correlata all'altezza media derivata da dati LiDAR ($P < 0.0001$; Figura 17) spiegando l'80% della variabilità del volume.

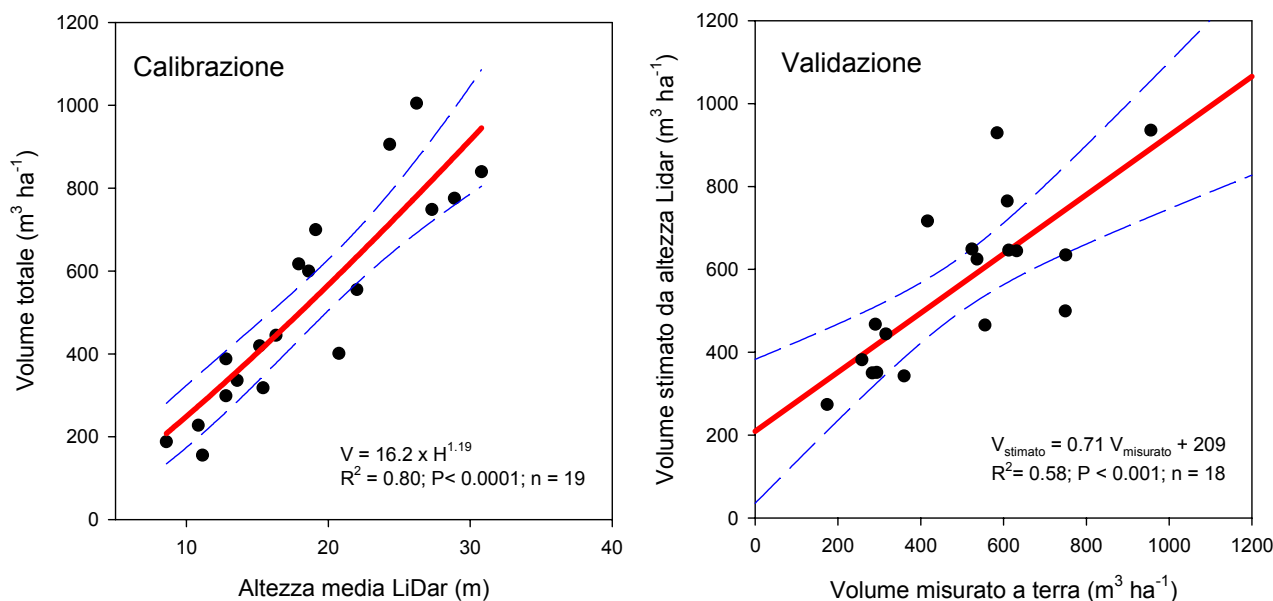


Figura 17: calibrazione in 19 punti estratti a caso tra quelli campionati del modello per la stima del volume totale unitario utilizzando l'altezza media derivata da dati LiDAR (a sinistra) e validazione del modello sui 18 punti rimanenti. Le linee tratteggiate blu rappresentano gli intervalli di confidenza al 95%.

La validazione del modello prescelto è risultata anch'essa significativa ($P < 0.001$; Figura 17). Altrettanto significativo è risultato il modello per la stima del volume per le piante con diametro maggiore a 12.5 cm (Figura 18).

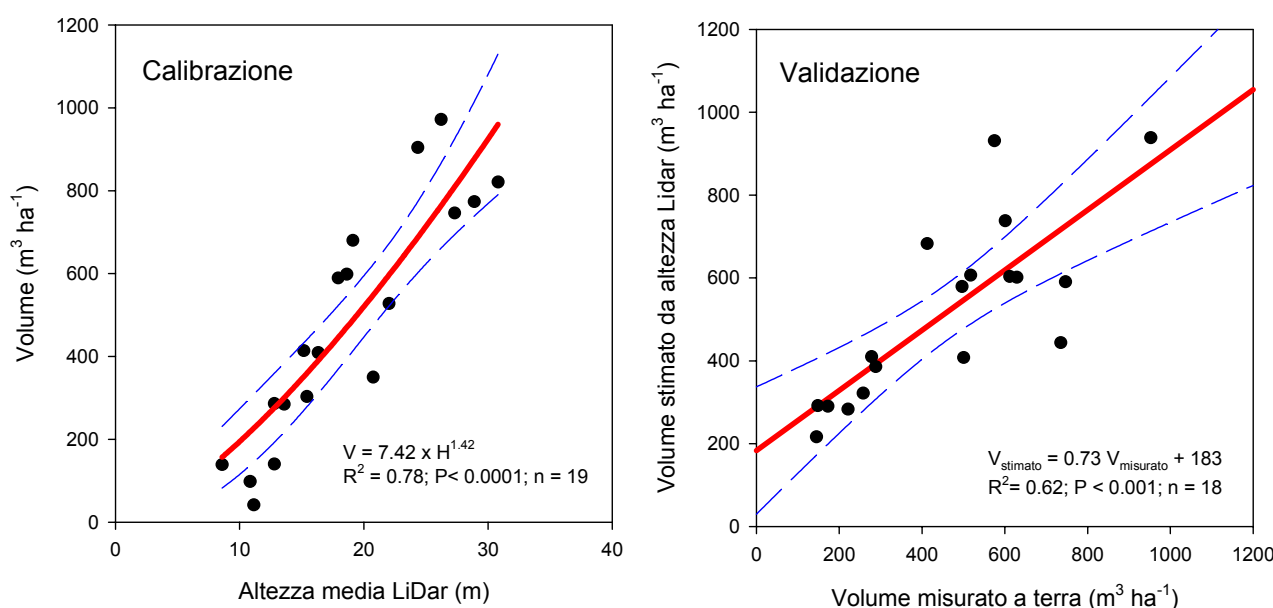


Figura 18: calibrazione in 19 punti estratti a caso tra quelli campionati del modello per la stima del volume delle piante con diametro maggiore di 12.5 cm utilizzando l'altezza media derivata da dati LiDAR (a sinistra) e validazione del modello sui 18 punti rimanenti. Le linee tratteggiate blu rappresentano gli intervalli di confidenza al 95%.

Sulla base dei due modelli ed utilizzando la carta delle strutture in cui è riportata l'altezza media LiDAR è stato quindi possibile costruire una carta della provvigione per l'intera area di studio. Complessivamente (piante con diametro > 4.5 cm, esclusi arbusteti), la provvigione è pari a 492.307 m^3 , ossia $533 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, e risulta distribuita nelle diverse categorie strutturali come riportato

in Tabella 24. Se si considerano solo le piante con $d > 12.5$ cm, la provvigione totale è di 450.087 m^3 pari a 487 $m^3 ha^{-1}$.

E' possibile notare una significativa corrispondenza tra i valori di provvigione totale unitaria derivati da LiDAR e quelli rilevati in campo (Figura 19)

Categoria strutturale	Tipo strutturale	Superficie (ha)	Volume totale (m³ ha⁻¹)		Volume d>12.5 (m³ ha⁻¹)	
novelletto	novelletto1	0	0	291	0	235
	novelletto2	2	291		235	
spessina	spessina1	45	203	243	152	189
	spessina2	75	267		211	
perticaia	perticaia1	60	364	420	305	364
	perticaia2	153	418		360	
	perticaia3	11	775		751	
fustaia adulta	fustaia adulta	169	626	626	582	582
fustaia matura	fustaia matura	180	811	811	792	792
multiplano	biplano	23	699	507	665	455
	multiplano	207	486		432	
	TOTALE	924	533		487	

Tabella 24: superficie, provvigione totale e provvigione totale unitaria per categoria strutturale considerando tutte le piante o solo quelle con diametro maggiore di 4.5 cm (esclusi arbusteti).

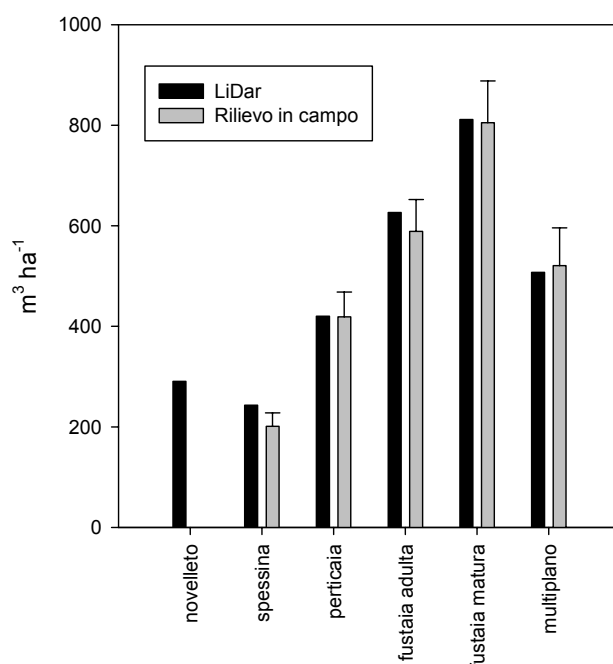


Figura 19: confronto tra provvigione totale unitaria (piante > 4.5 cm) per categoria strutturale derivata da dati LiDAR e misurata in campo. Le barre indicano l'errore standard della media.

Attraverso l'incrocio della carta della struttura con la carta dei tipi forestali del Friuli Venezia Giulia, è stato possibile determinare la distribuzione della provvigione nelle categorie e nei tipi forestali (escluse le mughete) (Tabella 25). Se si considera la categoria forestale prevalente in termini di superficie (piceo-faggeti), la provvigione totale unitaria è di 582 $m^3 ha^{-1}$, mentre la provvigione unitaria delle piante con $d > 12.5$ cm è pari a 539 $m^3 ha^{-1}$. Questo valore è leggermente

superiore a quanto mediamente riportato da Del Favero (2004), secondo cui le strutture monoplane a copertura regolare colma possono raggiungere, per i piceo-faggeti sull'Arco Alpino italiano, provvigioni tra 400 e 500 m³ ha⁻¹, anche se in media generalmente si attestano sui 300 m³ ha⁻¹ con altezze dominanti tra 27 e 30 m ed incrementi compresi tra 4 e 7 m³ ha⁻¹ anno⁻¹. Tuttavia, bisogna tener conto che molti dei popolamenti dell'area di studio hanno altezze dominanti superiori ai 30 m e che la maggior parte di essi sono in una fase di fustaia adulta o matura (rispettivamente, 22 e 24% della superficie ascrivibile alla categoria piceo-faggeti).

Categoria forestale	Tipo forestale	ha	Volume totale (m ³ ha ⁻¹)		Volume d > 12.5 cm (m ³ ha ⁻¹)	
Faggete	Faggeta montana tipica mesalpica	12.4	620	620	579	579
Lariceti	Lariceto primitivo	35.6	477	488	427	438
	Lariceto tipico dei substrati carbonatici	41.1	497		448	
Peccete	Pecceta azonale su alluvioni	7.6	459	542	406	496
	Pecceta dei substrati carbonatici altimontana, var. montana	8.8	411		360	
	Pecceta secondaria montana	47.6	580		536	
Piceo-abieteti	Piceo-faggeto dei suoli mesici carbonatici altimontano	35.4	581	582	535	539
	Piceo-faggeto dei suoli mesici carbonatici altimontano, var. con larice	44.2	543		498	
	Piceo-faggeto dei suoli mesici carbonatici montano	360.6	575		531	
	Piceo-faggeto dei suoli mesici carbonatici montano, var. con larice	4.2	804		783	
	Piceo-faggeto dei suoli mesici montano	0.2	790		766	
	Piceo-faggeto dei suoli xerici	88.7	567		523	
	Piceo-faggeto dei suoli xerici, var. con larice	67.0	655		620	
Pinete di pino nero e pino silvestre	Pineta di pino silvestre mesalpica con faggio e abete rosso	21.1	564	564	519	519
TOTALE		774.5	570		526	

Tabella 25: superficie, provvigione totale e provvigione unitaria per categoria e tipo forestale (escluse le mughete e gli arbusteti in generale) come derivata incrociando le informazioni contenute nella carta della struttura e nella carta dei tipi forestali del FVG.

Particolarmente rilevante appare la provvigione unitaria per le faggete (620 m³ ha⁻¹ per l'intero popolamento e 579 per le piante con d > 12.5 cm) legata, anche in questo caso, ad una netta prevalenza di fustaie adulte e mature (27% e 30% della superficie ascrivibile a questa categoria) (Tabella 26; Figura 20). Si può notare come nelle fasi di novelletto (soprattutto per i piceo-faggeti), il volume delle piante con d > 12.5 sia piuttosto rilevante a causa sempre della forma di trattamento

prevalentemente applicata (tagli successivi a gruppi) e quindi all'abbondanza di piante del vecchio ciclo.

Categoria forestale	Categoria strutturale	ha	Volume d > 12.5 cm (m ³ ha ⁻¹)
FAGGETE	novelletto	0	0
	spessina	0	0
	perticaia	5.1	423
	fustaia adulta	3.7	578
	fustaia matura	3.3	814
	multiplano	0.3	612
LARICETI	novelletto	0.8	167
	spessina	8.7	165
	perticaia	13.0	347
	fustaia adulta	13.4	566
	fustaia matura	11.6	772
	multiplano	29.1	377
PECCETE	novelletto	0	0
	spessina	7.6	190
	perticaia	10.9	414
	fustaia adulta	9.6	580
	fustaia matura	11.7	768
	multiplano	24.2	464
PICEO-FAGGETI	novelletto	0	409
	spessina	47.5	214
	perticaia	129.4	387
	fustaia adulta	130.6	585
	fustaia matura	144.4	797
	multiplano	148.5	485
PINETE DI PINO NERO E PINO SILVESTRE	novelletto	0.1	434
	spessina	1.2	133
	perticaia	5.1	394
	fustaia adulta	5.3	559
	fustaia matura	6.2	763
	multiplano	3.1	326
	TOTALE	774.5	526

Tabella 26: distribuzione della provvigione unitaria (m³ ha⁻¹) delle piante con d > 12.5 cm nelle categorie forestali e nelle categorie strutturali all'interno dell'area di studio (sono state escluse le mughete).

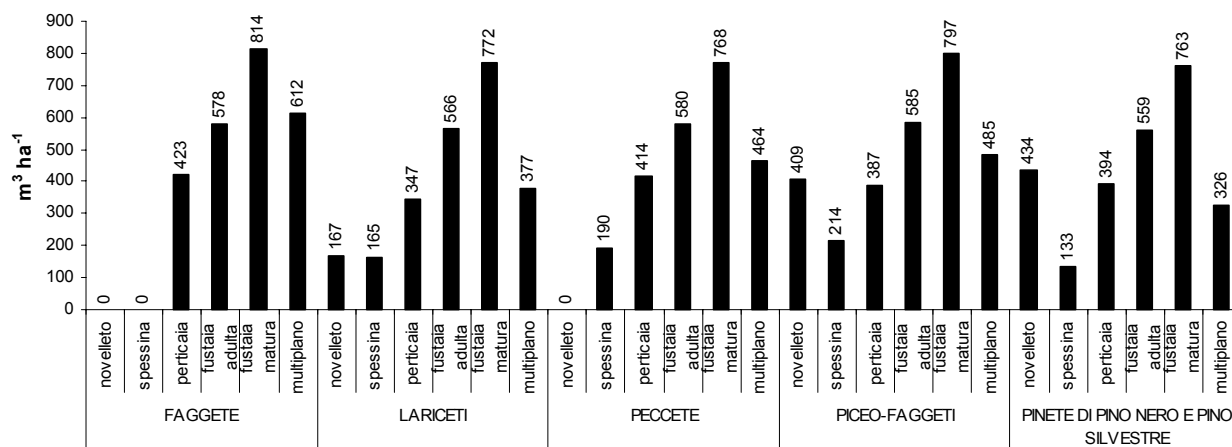


Figura 20: distribuzione della provvigione unitaria ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) delle piante con $d > 12.5 \text{ cm}$ nelle categorie forestali e nelle categorie strutturali all'interno dell'area di studio (sono state escluse le mughete).

Analogamente al volume, la categoria strutturale con il maggiore stock di carbonio epigeo misurato in campo è rappresentata dalla fustaia matura seguita dalla fustaia adulta e dal bosco multiplano (Tabella 27). Anche in questo caso, l'altezza media stimata da dati LiDAR è un buon estimatore dello stock di carbonio epigeo del soprassuolo. Infatti, la correlazione tra stock di carbonio ed altezza media è altamente significativa ($P < 0.0001$; Figura 21).

Categoria strutturale	Stock di carbonio epigeo (tC ha^{-1})	
	<i>totale</i>	<i>$d > 12.5 \text{ cm}$</i>
spessina	47 ± 3	31 ± 6
perticaia	107 ± 15	91 ± 17
fustaia adulta	151 ± 16	151 ± 16
fustaia matura	217 ± 23	216 ± 23
multiplano	140 ± 21	136 ± 21

Tabella 27: stock di carbonio epigeo per l'intero popolamento e per le piante con diametro maggiore a 12.5 cm per categoria strutturale rilevata a terra. Media \pm errore standard.

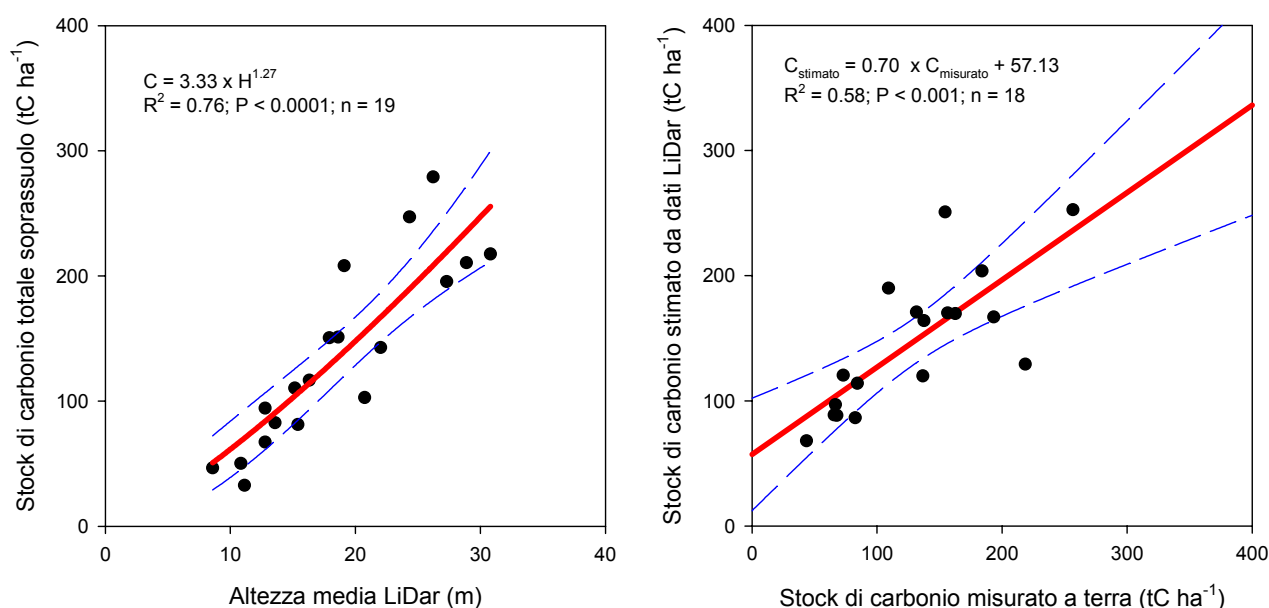


Figura 21: calibrazione in 19 punti estratti a caso tra quelli campionati del modello per la stima dello stock di carbonio totale unitario utilizzando l'altezza media derivata da dati LiDAR (a sinistra) e validazione del modello sui 18 punti rimanenti. Le linee tratteggiate blu rappresentano gli intervalli di confidenza al 95%.

La relazione così determinata ha consentito di stimare lo stock complessivo di carbonio epigeo ad esclusione degli arbusteti. Complessivamente lo stock di carbonio ammonta a 128.631 tC corrispondenti a 139 tC ha⁻¹. La maggior parte dello stock è localizzato in fustaie adulte o mature (Tabella 28).

Categoria strutturale	Tipo strutturale	Superficie (ha)	tC	tC ha ⁻¹
novelletto	novelletto1	0	0	-
	novelletto2	2	133	73
spessina	spessina1	45	2243	49
	spessina2	75	4966	66
perticaia	perticaia1	60	5543	92
	perticaia2	153	16322	107
	perticaia3	11	2188	207
fustaia adulta	fustaia adulta	169	27808	165
fustaia matura	fustaia matura	180	39116	217
multiplano	biplano	23	4220	185
	multiplano	207	26091	126
	TOTALE	924	128631	139

Tabella 28: stock di carbonio totale ed unitario (tutte le piante, esclusi arbusteti) per categoria e tipo strutturale derivato da dati LiDAR.

Dall'incrocio con la carta dei tipi forestali del Friuli Venezia Giulia, è stato possibile calcolare lo stock medio di carbonio ad ettaro per categoria e tipo forestale (Tabella 29). I valori sono in linea con quelli riportati da Anfodillo et al. (2006) per fustaie assestate di buona fertilità, eventuali differenze sono comunque da imputare alle diverse soglie di cavallettamento (17.5 cm per anfodillo; 4.5 nel presente studio).

Categoria forestale	Tipo forestale	ha	tC ha⁻¹	
Faggete	Faggeta montana tipica mesalpica	12.4	163	163
Lariceti	Lariceto primitivo	35.6	124	127
	Lariceto tipico dei substrati carbonatici	41.1	129	
Peccete	Pecceta azonale su alluvioni	7.6	118	142
	Pecceta dei substrati carbonatici altimontana, var. montana	8.8	106	
	Pecceta secondaria montana	47.6	152	
Piceo-abieteti	Piceo-faggeto dei suoli mesici carbonatici altimontano	35.4	152	153
	Piceo-faggeto dei suoli mesici carbonatici altimontano, var. con larice	44.2	142	
	Piceo-faggeto dei suoli mesici carbonatici montano	360.6	151	
	Piceo-faggeto dei suoli mesici carbonatici montano, var. con larice	4.2	215	
	Piceo-faggeto dei suoli mesici montano	0.2	211	
	Piceo-faggeto dei suoli xerici	88.7	149	
	Piceo-faggeto dei suoli xerici, var. con larice	67.0	173	
Pinete di pino nero e pino silvestre	Pineta di pino silvestre mesalpica con faggio e abete rosso	21.1	148	148
TOTALE		774.5	149	

Tabella 29: stock medio ad ettaro di carbonio epigeo per categoria e tipo forestale nell'area di studio.

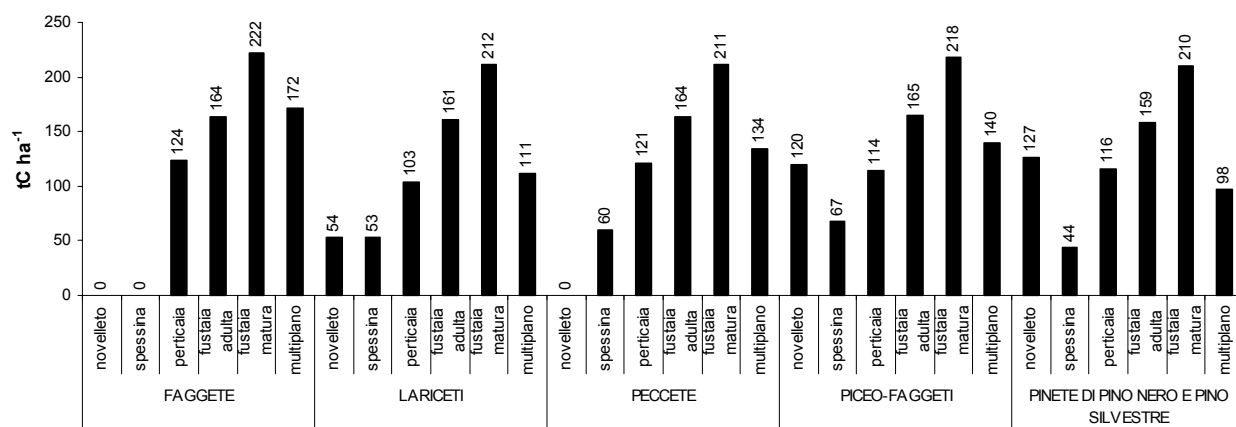


Figura 22: stock medio ad ettaro di carbonio epigeo per categoria forestale e tipo strutturale nell'area di studio.

Per quanto riguarda il legno morto, non è stata determinata alcuna correlazione significativa con nessuna delle variabili stimate da dati LiDAR (dati non riportati). Ciò è in parte legato alla difficoltà del LiDAR di descrivere ciò che si trova sotto copertura, ma anche al fatto che, essendo molti

soprassuoli gestiti, la ramaglia è spesso asportata o accatastata in mucchi e lasciata in bosco. Pertanto, l'eterogeneità all'interno di ogni soprassuolo è piuttosto elevata.

3.5 Analisi vegetazionale

Lo studio della vegetazione è stato sviluppato attraverso il riconoscimento delle principali cenosi vegetazionali e un'analisi dettagliata dei consorzi forestali rilevati. Inoltre, sulla base dei rilievi floristico-vegetazionali effettuati per le tipologie strutturali più rappresentative, è stata indagata la relazione tra struttura forestale e diversità biologica vegetale al fine di ottenere informazioni utili alla definizione di future strategie gestionali di conservazione silvo-naturalistiche..

3.5.1 Carta e caratterizzazione vegetazionale

Sulla scorta dei sopralluoghi e dei rilievi effettuati è stato possibile caratterizzare le due categorie vegetazionali della carta delle aree boscate (Tavola I) elaborata dai dati LiDAR. La prima categoria, relativa alle tipologie forestali, è riconducibile all'associazione vegetale dell'*Anemone trifoliae-Fagetum*; la seconda, comprendente tutte le formazioni arbustive, è indicata come mosaico di arbusteti alpini e perticaie a *Pinus mugo*.

3.5.1.1 Consorzi forestali misti a *Fagus sylvatica* e *Picea abies* dell' *Anemone trifoliae - Fagetum*

Habitat Natura 2000: 91K0 Boschi illirici a *Fagus sylvatica* (*Aremonio-Fagion*)
Habitat FVG: BL10 Piceo-faggete su dolomie e calcari dolomitici altimontane

Dal punto di vista sintassonomico tutti i rilievi sono riconducibili alla variante geografica ad *Helleborus niger* dell'associazione *Anemone-Fagetum* (Marinček et al., 1989), che racchiude tutti i boschi misti dominati da *Fagus sylvatica* e *Picea abies*. Si tratta di boschi a distribuzione illirica, edafoxerofili, che si sviluppano nel piano altimontano su substrati calcareo dolomitici (Poldini et al. 2006). Come descritto in letteratura, i rapporti di copertura fra *Fagus sylvatica* e *Picea abies* sono assai variabili. Anche per questo motivo, pur evidenziando *facies* attribuite da un punto di vista forestale a peccete secondarie d'impianto o faggete montane tipiche esalpiche (Del Favero et al. 1998), si è preferito mantenere una visione vegetazionale unitaria.

Non sono state altresì trattate o rilevate alcune piccole formazioni dominate da *Pinus sylvestris*, già indicate nella carta delle tipologie forestali, poiché, da quanto emerso dai sopralluoghi e dalle elaborazioni LiDAR, non risultano sufficientemente estese. A questo proposito risulta plausibile l'inclusione di tali formazioni nella var. *pynetosum sylvestris* dell'associazione descritta.

In regione sono presenti due varianti geografiche dell'associazione: una occidentale, maggiormente diffusa con *Luzula nivea*, ed una orientale ad *Helleborus niger*. Sulla scorta di queste considerazioni e vista l'elevata frequenza (Tabella 32) di *Helleborus niger*, l'intero complesso di rilievi risulta afferibile alla suddetta varietà geografica orientale.

Il collegamento all'associazione *Anemone-Fagetum* è garantito dalla costanza di elementi trasgressivi dalla classe *Vaccinio-Piceetea* quali *Picea abies*, con frequenza elevata in tutti gli strati vegetazionali, *Vaccinium myrtillus*, *Vaccinium vitis-idaea* subsp. *vitis-idaea*, e *Carex alba*, indicatrice di primitività edifica.

Il collegamento ai livelli sintassonomici superiori è garantito da un nucleo cospicuo di specie caratteristiche. Tra le specie caratteristiche di suballeanza (*Saxifraga-Fagenion*) si possono menzionare *Luzula sylvatica* subsp. *sieberi* e *Polystichum lonchitis*. La differenziale geografica che

collega all'alleanza illirica *Aremonio-Fagion* è *Anemone trifolia*. *Fagus sylvatica*, specie caratteristica dell'ordine *Fagetalia sylvaticae*, risulta costante in tutti gli strati vegetazionali. Oltre alle specie differenziali di associazione, è presente un ulteriore gruppo di specie provenienti dalla classe *Vaccinio-Piceetea*. Questo fenomeno rinsalda il forte legame tra le formazioni dei Piceo-Fageti e le foreste acidofile montane o subalpine dominate da *Picea abies*.

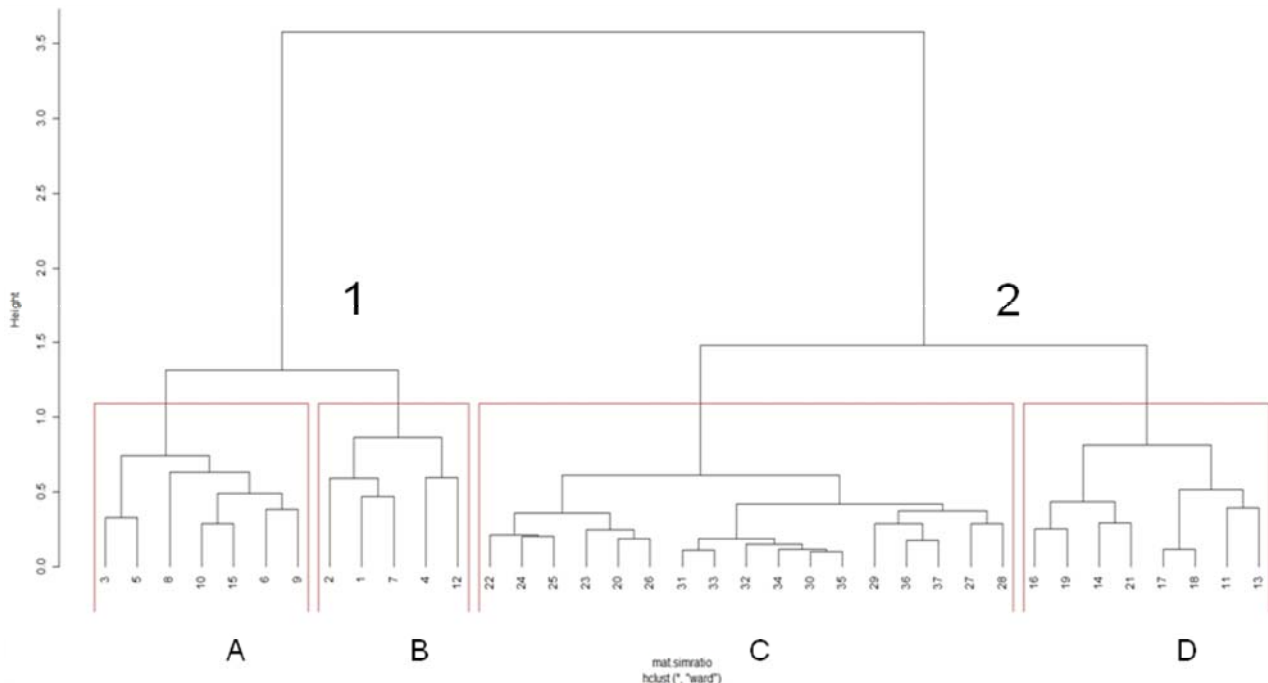


Figura 23: dendrogramma dei rilievi, Similarity ratio - metodo di Ward.

L'analisi dei rilievi ha permesso di individuare quattro principali varianti cenotiche riconducibili a varianti ecologiche o dinamiche dell'associazione trattata. Le tipologie individuate, vista l'omogeneità generale della vegetazione analizzata, non assumono valori sintassonomici. Tuttavia la separazione di tali entità rappresenta un contributo alla comprensione delle relazioni emerse tra struttura forestale, dinamica e valenza ecologica della foresta.

Le varianti si ripartiscono in due macrotipologie vegetazionali distinguibili in (Figura 23): **(1)** foreste miste primitive o poco evolute di sostrati neutri o acidoclini, corrispondenti principalmente a strutture a perticaia e multiplano; **(2)** foreste miste evolute o primitive, ricche in specie, principalmente riconducibili a fustaie.

Gruppo A - Stadi primitivi con poche specie caratteristiche, corteggio floristico impoverito e ricchi in Pteridofite

In questo gruppo si concentrano le formazioni strutturali meno evolute quali perticaie, spessine e foreste biplane. La struttura sfavorisce la presenza di specie caratteristiche di associazione e suballeanza. Al contrario il gruppo delle pteridofite è ben rappresentato. Molto frequenti sono *Dryopteris filix-mas*, *Polystichum lonchitis* (indicatrice di microtermia), e *Polystichum aculeatum*. Tra le dicotiledoni si distingue la maggior frequenza di *Lamium flavidum*.

Gruppo B - Stadi acidoclini mediamente evoluti a mirtilli

La categoria rappresenta stazioni con poche specie caratteristiche, in particolare di sub alleanza e ordine. In particolare si rileva la completa assenza di elementi molto comuni quale, ad esempio,

Cyclamen purpurascens subsp. *purpurascens*. Il numero di specie risulta mediamente elevato. La costanza di *Vaccinium myrtillus*, *Vaccinium vitis-idaea* subsp. *vitis-idaea* e *Luzula sylvatica* subsp. *sieberi* ne indicano la tendenza acidofila. A conferma del fenomeno è evidente l'incremento numerico degli elementi della classe *Vaccinio-Piceetea*. La copertura arborea è dominata da *Picea abies* mentre *Fagus sylvatica* presenta il valore di copertura meno elevato.

Gruppo C - Stadi eterogenei con elevata ricchezza floristica a partecipazione di *Larix decidua*

Si tratta di formazioni forestali eterogenee per struttura e composizione floristica. Oltre alle specie caratteristiche dell'associazione si rileva un nutrito corteggio floristico. Le formazioni si distribuiscono su suoli medio evoluti e sono spesso ricche in radure ed aperture. Questi fattori favoriscono la crescita di numerose specie trasgressive da altre formazioni, anche di tipo prativo quale ad esempio *Campanula scheuchzeri*. Lo strato arboreo ed arbustivo sono arricchiti dalla presenza di *Abies alba*, nelle stazioni più mesofile, e *Larix decidua* in quelle più microterme.

Gruppo D - Stadi maturi

L'incremento di entità caratteristiche indica l'elevato valore di maturità raggiunto dalle tipologie qui incluse. Si tratta di boschi ad elevata valenza conservazionistica ed ecologica, sia per l'elevato numero di specie mediamente censito, come trattato successivamente, sia per il grado di maturità raggiunto, indicato dalla frequenza di specie caratteristiche.

La variante descrive la forma più tipica dell'associazione, con un'elevata frequenza e copertura di *Helleborus niger*. Le specie diagnostiche individuate sono *Aposeris foetida* e *Dryopteris expansa*, tra le specie fagetali, *Hieracium murorum* e *Maianthemum bifolium*, tra quelle di classe *Vaccinio-Piceetea*.

	Cluster 1			Cluster 2			Totale
	A	B	Tot 1	C	D	Tot 2	
Novelletto	-	-	-	-	-	-	-
Spessina	1	1	2	3	-	3	5
Perticaia	4	-	4	3	2	5	9
Fustaia adulta	1	-	1	4	2	6	7
Fustaia matura	-	1	1	3	3	6	7
Biplano	1	1	2	-	-	-	2
Multipiano	-	2	2	4	1	5	7
Totale	7	5	12	17	8	25	37

Tabella 30: ripartizione delle categorie strutturali nelle tipologie vegetazionali individuate

Osservando la distribuzione delle tipologie strutturali attraverso i gruppi ottenuti dall'analisi multivariata (Tabella 30) non emerge una corrispondenza univoca tra struttura e tipo vegetazionale. È tuttavia possibile osservare come le categorie strutturali più mature (fustaia matura ed adulta) siano pressoché totalmente incluse nel *cluster* vegetazionale 2. Questo gruppo, come già descritto, rappresenta la forma più tipica dell'associazione *Anemono-Fagetum*.

Il confronto tra le aree classificate come boschi a conifere, latifoglie e formazioni miste ed i *cluster* vegetazionali individuati (Tabella 31) evidenzia, come già emerso per le strutture forestali, una assenza di corrispondenza univoca tra le categorie. Si evidenzia comunque una buona concordanza tra l'analisi della composizione del gruppo B, in cui la copertura arborea è dominata da *Picea abies*, e la categoria dei boschi a conifere. I boschi dominati da latifoglie e misti sono prevalentemente

distribuiti nella categoria C, a conferma dell'eterogeneità strutturale e vegetazionale del *cluster*, in cui si concentrano formazioni generalmente poco mature. Nel gruppo di rilievi D, in cui sono incluse le cenosi più mature, i boschi più rappresentati sono quelli dominati da conifere e misti.

	Cluster 1			Cluster 2			
	A	B	Tot 1	C	D	Tot 2	Totale
Latifoglie	4	-	4	6	1	7	11
Conifere	1	5	6	3	5	8	14
Misto	2	-	2	8	2	10	12
Totale	7	5	12	17	8	25	37

Tabella 31: collocazione dei rilievi nella classificazione LIDAR di boschi a conifere, latifoglie e misti e corrispondenti tipologie vegetazionali individuate

3.5.1.2 Mosaico di arbusteti alpini e perticaie a *Pinus mugo*.

In questa categoria vegetazionale sono stati incluse tutte le superfici classificate dai dati LiDAR quali arbusteti (Tavola 1, aree boscate). Per questa tipologia non sono stati effettuati rilievi vegetazionali, tuttavia è stato possibile riconoscere tre categorie vegetazionali mediante analisi speditiva.

La categoria delle perticaie a *Pinus mugo* è la più diffusa. Le formazioni incluse nella categoria sono riferibili all'alleanza *Erico-Pinion mugo*. Le cenosi riscontrate in loco sono afferibili a due associazioni presenti in regione, il *Rhododendro hirsuti-Pinetum prostratae* e il *Sorbo chamaemespili-Pinetum mugii*. La prima corrisponde a formazioni mesofile di versanti freschi caratterizzata dalla presenza di *Rhododendron chamaecistus*, la seconda rappresenta formazioni microterme, localmente localizzate lungo colatoi e ad elevata altitudine, ove la permanenza della neve è più prolungata (Poldini et al., 2004). Le due associazioni rientrano nell'habitat prioritario Natura 2000: "4070 - *Perticaie di *Pinus mugo* e *Rhododendron hirsutum* (*Mugo-Rhododendretum hirsuti*)" corrispondente all'habitat FVG "GC8 Mughete altimontano-subalpine su substrati basici".

Negli arbusteti sono altresì inclusi gli spalti rupestri colonizzati dai lariceti primari dell'associazione *Rhododendron-Laricetum*. La formazione si presenta molto frammentata e poco estesa. Lo strato arboreo non è molto compatto ed il sottobosco è ben sviluppato e caratterizzato da *Rhododendron hirsutum*, *Rhododendron ferrugineum*, *Rhododendron chamaecistus* e *Juniperus communis* (Poldini et al., 2006). I lariceti primari rientrano nella categoria Natura 2000: "9420 - Foreste alpine a *Larix decidua* e/o *Pinus cembra*", habitat FVG BC11 Lariceti dei *plateaux* calcarei con *Rhododendron hirsutum*. Nell'area di studio risultano difficilmente raggiungibili e difficilmente distinguibili dalla mughete.

Nelle zone adiacenti ai corpi idrici e in corrispondenza della zona umida posta nella parte meridionale dell'area di studio, sono state riscontrate alcune formazioni igrofile e pioniere a *Salix* sp. pl.. In particolare, lungo l'asta dei torrenti principali sono state riscontrate comunità a salici pionieri (*Salix eleagnos*, *Salix purpurea*) afferibili all'alleanza *Salicion eleagno-daphnoidis*. In corrispondenza dello specchio del lago superiore è stata invece rilevata la presenza di popolamento a *Salix alba*, la cui sede sintassonomica corrisponde all'alleanza *Salicion albae*.

Queste ultime formazioni risultano tuttavia del tutto marginali, per questo non sono state separate dalla categoria del mosaico di arbusteti alpini.

Schema sintassonomico dei sintaxa trattati (Poldini et al., 2006, Mucina et al, 1993)

***Querc-Fagetea* Br.-Bl. et Vlieg. in Vlieg. 1937**

Fagetalia sylvaticae Pawl. in Pawl. et al. 1928

Aremonio-Fagion (Ht. 1938) Török, Podani et Borhidi 1989

Saxifrago rotundifoliae-Fagenion Marinček, Poldini et Zupančič ex Marinček et al. 1993

Anemone trifoliae-Fagetum Tregubov 1962

***Erico-Pinetea* Horvat 1959**

Erico-Pinetalia Horvat 1959

Erico-Pinion mugo Leibundgut 1948 nom. inv.

Rhododendro hirsuti-Pinetum prostratae Zöttl 1951 nom. inv.

Sorbo chamaemespili-Pinetum mugi Minghetti 1996

Rhodothamno-Laricetum (Zukrigl 1973) Willner et Zukrigl 1999

***Salicetea purpureae* Moor 1958**

Salicetalia purpureae Moor 1958

Salicion eleagno-daphnoidis (Moor 1958) Grass 1993

Salicion albae Soó em. Moor 1958

Specie	Strato	Freq.	A			Freq.	B			Freq.	C			Freq.	D			Freq. tot.
			min	moda	max		min	moda	max		min	moda	max		min	moda	max	
Differenziali di associazione Anemone trifoliae-Fagetum																		
Picea abies / abies	A	71	1	3	4	80	1	4	4	82	+	3	5	88	1	4	4	81
	B	86	+	2	4	100	1	1	3	94	+	1	4	50	+	1	1	84
	C	71	+	+	2	80	1	1	2	71	+	+	2	88	+	+	+	76
Vaccinium myrtillus		29	1	1	1	100	2	3	5	88	r	+	3	75	+	+	1	76
Carex alba						40	1		2	47	+	+	3	38	+	1	1	35
Vaccinium vitis-idaea / vitis-idaea						80	+	1	1	24	+	+	1	13	+		+	24
Larix decidua	A									18	1	3	3					8
Differenziale di variante geografica ad Helleborus niger																		
Helleborus niger / niger						20	1		1	41	1	1	2	50	1	3	3	32
Caratteristiche e differenziali della sub alleanza Saxifraga -Fagenion																		
Luzula sylvatica / sieberi		29	+	+	+	100	+	1	1	47	+	+	2	38	+		2	49
Polystichum lonchitis		71	+	+	+	40	+	+	+	24	+	+	+					30
Polygonatum verticillatum		29	+	+	+					35	+	+	+	13	+		+	24
Saxifraga rotundifolia / rotundifolia		43	+	1	1	40	+	+	+	6	+		+	13	+		+	19
Geum rivale										24	+	+	+	13	+		+	14
Gymnocarpium dryopteris		29	+		1					12	r		+	13	1		1	14
Viola biflora						20	+		+	12	+	+	+	13	+		+	11
Homogyne alpina						60	+	+	+									8
Chaerophyllum hirsutum / hirsutum						20	+		+					13	1		1	5
Rosa pendulina														25	+	+	+	5
Sanicula europaea										12	+	+	+					5
Salix appendiculata	B					20	+		+	6	1		1					5
	C													13	r		r	3
Caratteristiche e differenziali dell'alleanza Aremonio-Fagion																		
Anemone trifolia / trifolia		71	+	+	1	100	+	+	1	82	+	+	1	100	+	+	1	86
Cardamine trifolia		43	+		2	60	+	+	2	35	+	1	1	50	1	1	2	43

Specie	Strato	A				B				C				D				Freq. tot.
		Freq.	min	moda	max	Freq.	min	moda	max	Freq.	min	moda	max	Freq.	min	moda	max	
Aposeris foetida						60	+		3	29	+	+	1	75	+	+	1	38
Cyclamen purpurascens / purpurascens		14	+		+					47	+	+	1	50	r	1	1	35
Cardamine enneaphyllos		43	+	+	+	20	+		+	29	+	+	1	50	+	+	+	35
Knautia drymeia						20	1		1	18	+	+	2	13	+		+	14
Homogyne sylvestris		14	+		+	20	+		+	6	+		+	13	1		1	11
Caratteristiche e differenziali di ordine Fagetalia sylvaticae																		
Fagus sylvatica / sylvatica	A	100	2	5	5	60	1	1	3	88	1	5	5	75	1	5	5	84
	B	100	1	2	4	100	1	1	5	76	+	1	5	88	1	1	2	86
	C	100	+	+	1	100	+	+	3	76	+	+	2	63	r	+	1	81
Lamium flavidum		86	+	+	1	40	+		1	47	+	+	1	63	+	+	+	57
Acer pseudoplatanus	A	29	2	2	2					12	+		1					54
	B	29	+		1					35	+	+	2					11
	C	29	+		1	60	+	+	+	71	+	+	1	38	+	+	+	22
Dryopteris filix-mas		100	+	+	1	20	1		1	24	+	1	1	38	+	+	1	41
Daphne mezereum	B					40	+	+	+	35	+	+	1	63	+	+	+	35
	C					20	+		+	41	+	+	+	25	1	1	1	27
Viola reichenbachiana		14	+		+					29	+	+	+	63	+	+	+	30
Dryopteris expansa						40	+		1	18	+	+	1	75	+	+	1	30
Euphorbia amygdaloides / amygdaloides						20	+		+	29	+	+	1	50	+	+	1	27
Mycelis muralis		29	+		1	20	+		+	24	+	+	+	38	+	+	1	27
Polystichum aculeatum		71	+	+	+	20	1		1	18	+	+	+	13	+		+	27
Phyteuma spicatum s.l.		29	+	+	+	40	+		1	29	+	+	+					24
Gymnocarpium robertianum		29	+	+	+	20	1		1	18	+	1	1	38	+	+	+	24
Athyrium filix-femina		29	+	+	+	40	+		1	12	+	+	+	25	+		1	22
Laburnum alpinum	B	14	+		+					24	+	1	2	13	+		+	16
	A	29	1	1	1					12	+		1					11
	C	29	+	+	+					12	+	+	+	13	+		+	14
Paris quadrifolia						40	+	+	+	24	+	+	+					16
Lonicera alpigena / alpigena	B					20	+		+	24	+	+	2					14

Specie	Strato	Freq.	A			Freq.	B			Freq.	C			Freq.	D			Freq. tot.
			min	moda	max		min	moda	max		min	moda	max		min	moda	max	
	C									12	+	+	+					5
Senecio ovatus / ovatus		14	+		+	20	+		+	6	+		+	13	+		+	11
Saxifraga cuneifolia / robusta		14	+		+					12	<i>l</i>	<i>l</i>	<i>l</i>					8
Actaea spicata		29	+	+	+									13	+		+	8
Carex sylvatica / sylvatica														38	+	+	<i>l</i>	8
Mercurialis perennis		14	+		+					6	<i>l</i>		<i>l</i>					5
Milium effusum s.l.						20	<i>l</i>		<i>l</i>	6	<i>l</i>		<i>l</i>					5
Brachypodium sylvaticum / sylvaticum						20	<i>l</i>		<i>l</i>					13	+		+	5
Geranium robertianum / robertianum		14	+		+					6	+		+					5
Caratteristiche e differenziali di classe Querco-Fagetea																		
Hepatica nobilis		43	+	+	+	40	+		<i>l</i>	47	+	+	<i>l</i>	75	+	+	<i>l</i>	51
Carex digitata		14	+		+	40	<i>l</i>		2	35	+	+	2	50	+	+	<i>l</i>	35
Mercurialis ovata		43	+	+	+					29	+	+	2	38	+	+	+	30
Melica nutans						40	+		<i>l</i>	29	+	+	2	38	<i>r</i>	+	+	27
Cephalanthera rubra										18	<i>r</i>	+	+	25	+	+	+	14
Berberis vulgaris / vulgaris	B					20	2		2	12	+		2					8
	C									6	+		+					3
Sorbus aria (aggr.)	B					20	+		+					13	+		+	5
	C													13	+		+	3
Corylus avellana	B									6	<i>l</i>		<i>l</i>					3
	C													13	+		+	3
Caratteristiche di classe Vaccinio-Piceetea																		
Oxalis acetosella		100	+	+	<i>l</i>	60	+	<i>l</i>	<i>l</i>	82	+	+	2	63	+	+	2	78
Hieracium murorum						60	+	+	2	47	+	+	<i>l</i>	88	+	+	<i>l</i>	49
Maianthemum bifolium						40	+		2	29	+	+	<i>l</i>	75	+	+	<i>l</i>	35
Rubus saxatilis	B									12	+	+	+	13	+		+	8
	C	14	+		+	40	+	+	+	24	<i>r</i>	+	+	25	+	+	+	24
Abies alba	A									6	2		2					3

Specie	Strato	Freq.	A			Freq.	B			Freq.	C			Freq.	D			Freq. tot.
			min	moda	max		min	moda	max		min	moda	max		min	moda	max	
	B									18	+	+	<i>I</i>				8	
	C									18	+	+	+	13	<i>r</i>		<i>r</i>	11
Huperzia selago / selago		14	+		+	60	+	+	+	6	+		+	13	+		+	16
Veronica urticifolia		14	<i>I</i>		<i>I</i>	40	+	+	+	12	+	+	+	25	+	+	+	19
Phegopteris connectilis						20	<i>I</i>		<i>I</i>	6	+		+	38	+	+	+	14
Clematis alpina / alpina	B									6	+		+					3
	C									24	+	+	<i>I</i>	13	+		+	14
Gentiana asclepiadea										6	+		+	13	+		+	5
Solidago virgaurea s.l.						20	+		+	6	+		+					5
Compagne																		
Sorbus aucuparia s.l.	A	29	+		<i>I</i>					24	+	+	<i>I</i>					16
	B									6	<i>I</i>		<i>I</i>					3
	C	14	+		+					47	+	+	<i>I</i>	63	+	+	+	38
Moehringia muscosa		14	+		+	20	+		+	41	+	+	<i>I</i>	38	+	+	+	32
Prenanthes purpurea		29	+	+	+					35	+	+	<i>I</i>	25	+	+	+	27
Calamagrostis varia / varia						40	+		2	24	+	+	<i>I</i>	38	+	<i>I</i>	<i>I</i>	24
Ajuga pyramidalis		29	+	+	+	20	+		+	18	<i>r</i>	+	+	25	+	+	+	22
Erica carnea / carnea						40	<i>I</i>	<i>I</i>	<i>I</i>	35	+	+	2					22
Ranunculus montanus (aggr.)						60	+	<i>I</i>	<i>I</i>	18	+	+	+	25	+		<i>I</i>	22
Polypodium vulgare		14	+		+	20	+		+	24	+	+	<i>I</i>	25	+	+	+	22
Asplenium viride		14	+		+	60	+	+	<i>I</i>					25	+	+	+	16
Fragaria vesca						20	+		+	24	+	+	+	13	+		+	16
Asplenium trichomanes s.l.		29	+	+	+	20	+		+	12	+		<i>I</i>	13	+		+	16
Petasites paradoxus		14	+		+	20	<i>I</i>		<i>I</i>	12	+	+	+	13	+		+	14
Ranunculus polyanthemophyllus		14	+		+	60	+	+	+					13	+		+	14
Veronica officinalis										12	+		<i>I</i>	25	<i>I</i>	<i>I</i>	<i>I</i>	11
Aquilegia atrata						20	+		+	12	+	+	+					8
Asplenium ruta-muraria s.l.										12	+	+	+	13	+		+	8
Galeopsis speciosa										6	<i>I</i>		<i>I</i>	25	+	+	+	8

Specie	Strato	A				B				C				D				Freq. tot.
		Freq.	min	moda	max	Freq.	min	moda	max	Freq.	min	moda	max	Freq.	min	moda	max	
Melampyrum pratense / pratense						20	+		+	12	+	+	+					8
Polygala chamaebuxus						20	+		+	12	+		<i>I</i>					8
Urtica dioica / dioica		14	<i>I</i>		<i>I</i>	20	+		+	6	+		+					8
Cardamine pentaphyllos		14	+		+									13	+		+	5
Ajuga genevensis										12	+	+	+					5
Campanula scheuchzeri										12	+	+	+					5
Cystopteris fragilis										6	+		+	13	+		+	5
Galium mollugo (aggr.)														25	+	+	+	5
Juniperus communis / alpina B						40	+		<i>I</i>									5
Stachys recta						20	+		+	6	<i>I</i>		<i>I</i>					5
Stellaria nemorum		29	+		<i>I</i>													5
Veratrum lobelianum		14	+		+									13	+		+	5

Tabella 32: tabella sintetica delle cenosi rilevate. Nella tabella sono riportate le percentuali di frequenza delle singole specie nei quattro gruppi individuati e valori di coperture (minimo, moda e massimo). In tabella non sono riportate le specie sporadiche con una frequenza complessiva inferiore al 5 %. Le attribuzioni fitosociologiche seguono Marinček et al., (1989), Poldini & Nardini (1993) e Oberdorfer (2001).

3.5.2 Biodiversità e struttura

Nelle 37 aree campione censite sono stati rilevati 144 *taxa* vegetali (comprensivi di specie ed entità sotto specifiche) distribuiti in 49 famiglie. Mediamente specie per ogni area (100 m²) sono stati individuati 24 *taxa*.

I dati raccolti sono stati elaborati al fine di individuare le eventuali relazioni tra livello di biodiversità e categoria strutturale individuata dal LiDAR. Sulla base di presupposti di coerenza ecologica delle strutture forestali i tipi strutturali sono stati accorpati secondo la definizione di categorie maggiori, in particolare, le categorie "Multiplano e Biplano" sono state accorpate ulteriormente come strutture multiplane generiche. Come già specificato nella parte metodologica, per la categoria strutturale dei novelleti non sono stati effettuati rilievi.

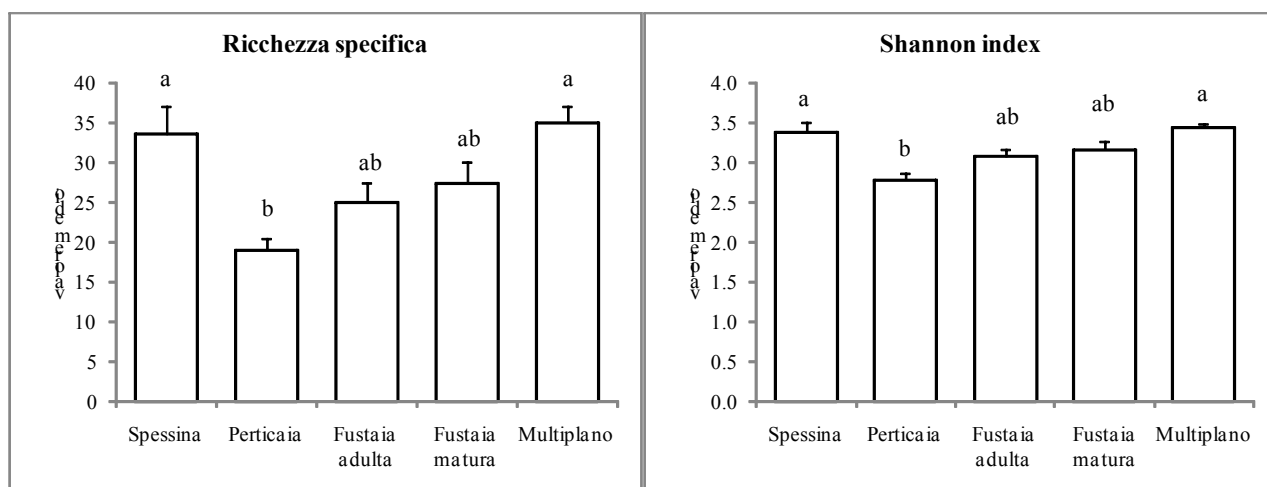


Figura 24: ricchezza floristica e indice di Shannon per le strutture LiDAR, gruppi distinti per $P < 0.05$. Le barre verticali indicano l'errore standard della media.

L'andamento dei valori di diversità floristica attraverso le categorie strutturali (Figura 24) evidenzia differenze statisticamente significative tra spessina, multiplano e perticaia ($P < 0.01$). Le medie delle formazioni a fustaia (adulta e matura) non si discostano dai valori estremi ($p > 0.05$). Si delinea comunque una tendenza positiva per numero di specie e biodiversità attraverso gli stadi a perticaia, fustaia adulta e fustaia matura.

Emerge un diverso contributo da parte degli strati erbaceo ed arbustivo. La biodiversità delle foreste indagate è principalmente riferibile alla ricchezza floristica dello strato erbaceo (Figura 25). Il valore medio di specie rilevate nello strato erbaceo è di 22 con indice di Shannon (IS) pari a 3,0. Le strutture forestali multiplane (biplano e multiplano) risultano avere i valori di diversità maggiore (29 specie e $IS = 3,3$), con differenza statisticamente significativa dai valori minimi delle perticaie (15 specie e $IS = 2,6$). Per lo strato erbaceo le spessine si differenziano solo per il valore dell'indice di Shannon. L'incremento di specie erbacee dagli stadi meno maturi a quelli maturi si evidenzia anche per l'analisi di questo strato.

Lo strato arbustivo, che contribuisce sensibilmente al livello di diversità delle spessine e delle foreste multiplane, mostra differenze statisticamente significative tra spessine e perticaie, fustaie adulte e fustaie mature.

L'elevata ricchezza delle spessine e delle formazioni multiplane è probabilmente imputabile, come già sottolineato nell'analisi vegetazionale, all'inclusione di un elevato numero di specie trasgressive da ambienti aperti e degli arbusteti. Questa tendenza è legata a due diversi fenomeni, uno dovuto

alla primitività delle formazioni, in cui possono partecipare specie ecologicamente poco esigenti, e l'altro dovuto alla struttura a copertura arborea discontinua, che permette l'ingresso di specie prative più eliofile. Nel contempo, la costante tendenza all'incremento di biodiversità, visibile soprattutto per il sottobosco passando da strutture meno mature (perticaia) a più mature (fustaia adulta e matura), sembra imputabile all'aumento di complessità nelle formazioni climaciche. Questo fenomeno, se collegato alle strutture forestali analizzate, è legato ad una riduzione della densità delle piante arboree ed evoluzione pedogenetica.

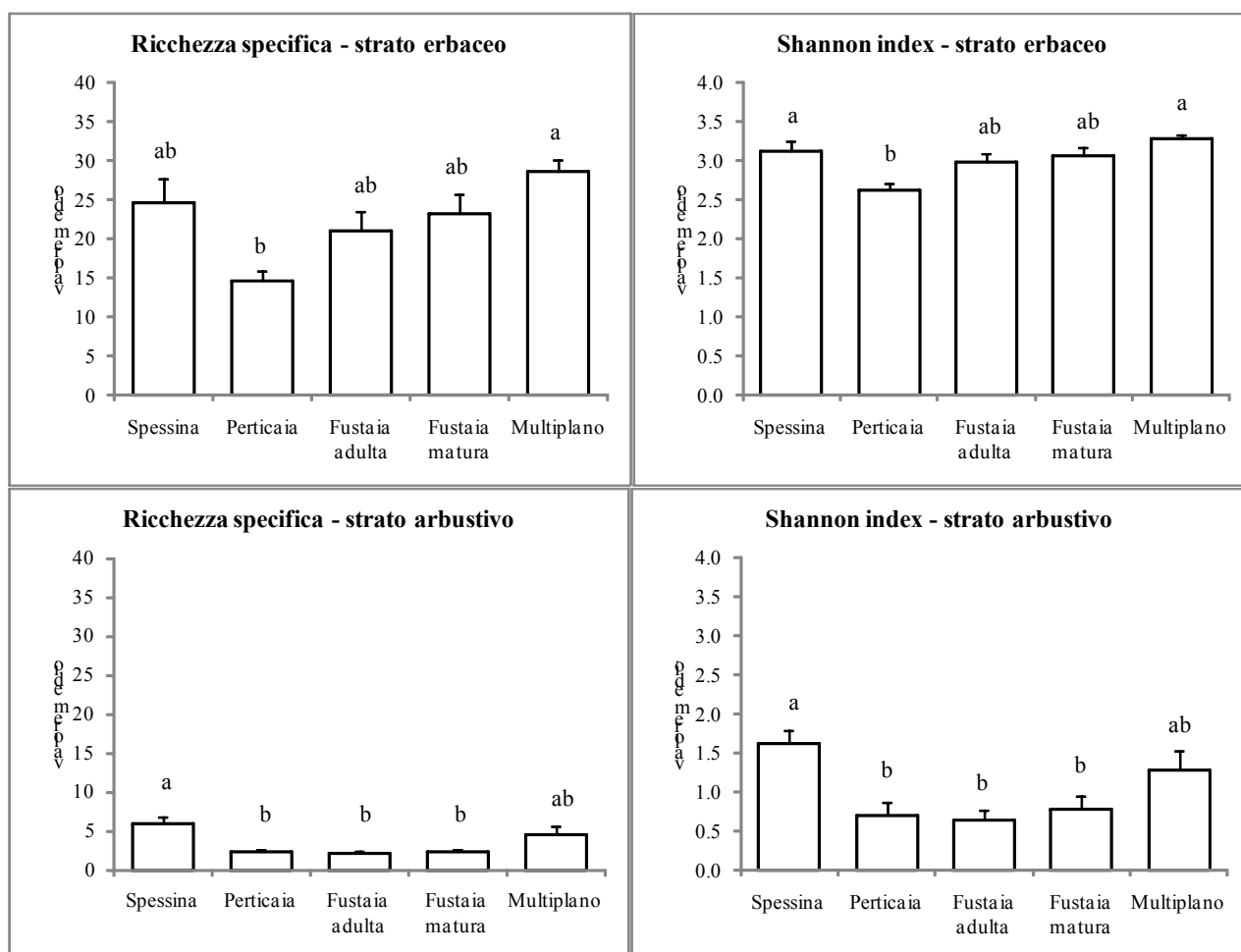


Figura 25: Ricchezza floristica e indice di Shannon per le strutture LiDAR, strato erbaceo ed arbustivo, gruppi distinti per $P < 0.05$. Le barre verticali indicano l'errore standard della media.

Il legame tra biodiversità e maturità di un ecosistema si evince confrontando i valori degli indici delle fustaie adulte e delle spessine. I due stadi mostrano valori statisticamente identici, pur rappresentando situazioni ecologiche distanti. L'effettiva differenza tra le strutture è quindi da ricercarsi nell'analisi del corteggio floristico, risulta evidente come il contributo delle specie caratteristiche, ecologicamente più esigenti, sia maggiore negli stadi più maturi (Franch et al., 2008; Mihai et al., 2004).

Risulta quindi fondamentale incrociare le due analisi condotte al fine di ottenere un'informazione in grado di promuovere una miglior conservazione naturalistica delle foreste, mirata sia ad una maggior diversità sia ad un maggior livello di naturalità.

Nell'area indagata lo spettro biologico della florula complessiva (Figura 26) concorda con quanto riportato in letteratura per i consorzi forestali misti di latifoglie (Poldini & Nardini, 1993; Del

Favero et al. 1998). Le fanerofite (15 %) e le emicriptofite (55 %) presentano valori particolarmente elevati se confrontati con lo spettro biologico regionale (Poldini et al., 2001). Le geofite raggiungono in questi ambienti il loro *optimum* ecologico (23 %). Al contrario le terofite, spesso legate ad ambienti molto dinamici o ruderali, sono poco frequenti, a testimonianza del buono stato di conservazione della foresta.

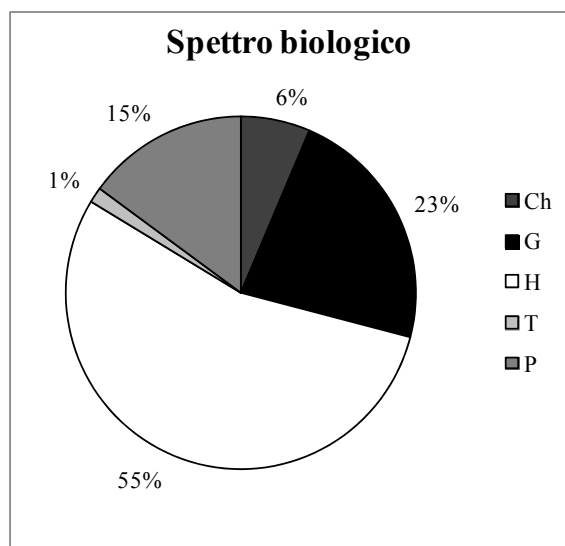


Figura 26: spettro biologico della florula totale. Ch - Camefite; G - Geofite; H - Emicriptofite; T - Terofite; P - Fanerofite (incluse nano fanerofite).

Dal confronto delle varie categorie strutturali (Tabella 33) si può evidenziare una complessiva omogeneità degli spettri biologici calcolati. I gruppi meglio rappresentati sono le emicriptofite, le geofite e le fanerofite. Le camefite sono uniformemente distribuite in tutte le strutture analizzate. Le geofite risultano particolarmente frequenti in corrispondenza delle perticaie e delle fustaie adulte. Queste piante, adattate ad ambienti particolarmente sciafili, confermano l'elevata compattezza della copertura di queste strutture. Le emicriptofite mostrano un comportamento opposto alle geofite. Esse risultano particolarmente frequenti nelle strutture multiplane e mature, a densità forestale minore. Le fanerofite, in cui vengono incluse anche le specie nano fanerofite, sono invece più abbondanti nelle spessine, che, come già evidenziato precedentemente (Figura 25) presentano un elevato numero di specie arbustive.

	Ch %	G %	H %	T %	P %
spessina	7	28	47	-	18
perticaia	7	36	40	-	17
fustaia matura	7	29	49	3	12
fustaia adulta	7	30	45	1	17
multiplano	8	22	54	1	14

Tabella 33: spettro biologico delle strutture forestali rilevate, valori riassuntivi dei tre starti vegetazionali indagati. Ch - Camefite; G - Geofite; H - Emicriptofite; T - Terofite; P - Fanerofite (incluse nano fanerofite).

3.6 Contributo per l'identificazione di aree forestali ad elevato valore naturalistico

Le aree forestali ad elevato valore naturalistico (HNVF) sono definite come “foreste naturali e seminaturali dove la gestione (passata o presente) supporta un'elevata diversità di specie native e habitat e/o la presenza di specie di importanza comunitaria e/o nazionale e/o regionale” (IEEP, 2007). Tali aree rappresentano il riferimento per il monitoraggio e la valutazione dell'efficacia degli interventi di sviluppo rurale rispetto all'obiettivo strategico di “preservazione e sviluppo dei sistemi agricoli e forestali ad alto valore naturale”(Commissione europea, 2006).

Alla luce di tali adempimenti il Ministero delle Politiche Agricole Alimentari e Forestali ha emanato delle Linee metodologiche per la stima delle aree forestali ad alto valore naturale a livello nazionale e regionale (Trisorio, 2009), dove vengono indicati alcuni requisiti specifici quali:

- 1- esclusione di boschi di chiara origine artificiale (per es., i robinieti);
- 2- presenza della formazione nell'elenco degli habitat naturali e seminaturali previsti nella Direttiva 92/43/CEE (“Direttiva Habitat”);
- 3- presenza del popolamento in aree protette di interesse comunitario, nazionale o regionale;
- 4- struttura del popolamento forestale (i popolamenti disetanei o invecchiati sono considerati importanti ai fini della conservazione della biodiversità);
- 5- la presenza di margini con superfici ad altro uso del suolo (ecotoni) o di microhabitat (es. alberi monumentali, sorgenti ecc.) di rilevante interesse locale.

Inoltre, vengono ritenuti di particolare importanza parametri quali il volume del legno morto e la diversità di specie arboree.

Nel caso in esame è emerso come la cartografia derivata dai dati LiDAR consenta di ottenere informazioni rispetto alla presenza nel territorio forestale di alcuni dei suddetti requisiti.

In particolare, l'identificazione della struttura del popolamento forestale attraverso categorie di bosco coetaneo, disetaneo, o multi stratificato ha mostrato un buon accordo con i rilievi a terra soprattutto per le formazioni più mature rappresentate dalla fustaia adulta e dalla fustaia matura (requisito 4), per altro indicate come importanti ai fini naturalistici.

L'analisi vegetazionale ha consentito di caratterizzare le categorie individuate dalla carta delle aree boscate in relazione alla loro corrispondenza a tipologie di habitat naturali o seminaturali previsti dalla Direttiva 92/43/CEE. In questo caso, la copertura boscata derivata dai dati LiDAR consente di ottenere ottime informazioni sulla distribuzione spaziale delle formazioni, ma necessità di essere integrata da analisi specifiche della fitocenosi per poter essere considerata un indicatore utile per rispondere al terzo criterio indicato dal documento ministeriale.

Per quanto concerne l'indicatore rappresentato dal legno morto, non è stata evidenziata nessuna correlazione con le variabili stimate da dati LiDAR, quindi i risultati ottenuti non consentono la sua valutazione.

La diversità in specie vegetali rappresenta un altro criterio indicato per l'identificazione delle aree HNV, che nel caso esaminato è stato considerato nel senso più ampio misurando la ricchezza in specie delle diverse classi forestali, con un approfondimento relativo agli specifici contributi apportati dalle singole componenti erbacea ed arbustiva. Tale analisi, riferita alla carta della struttura forestale, mette in luce due aspetti fondamentali: il primo è relativo allo stretto legame tra

struttura e biodiversità, reso evidente dall'elevato numero di specie in formazioni meno mature (es. spessina) caratterizzate da fitocenosi più primitive e copertura arborea discontinua, il secondo concerne la necessità di introdurre come ulteriore parametro di analisi la naturalità del sistema. Infatti, l'analisi del corteggio floristico consente di evidenziare l'effettivo contributo delle specie indicate come caratteristiche della specifica associazione vegetale. Tali specie sono ecologicamente più esigenti e quindi indicatrici di una maggiore maturità e naturalità del sistema.

I risultati fino a qui illustrati rappresentano un contributo allo sviluppo di approcci operativi per la caratterizzare delle realtà regionali, evidenziata come necessità dai documenti ministeriali di indirizzo per la stima della presenza di aree forestali ad alto valore naturale a livello regionale.

3.7 Mappatura della fragilità territoriale

Di seguito sono riportati gli strati informativi di sintesi dell'analisi della fragilità territoriale nell'area di studio della conca di Fusine. Ciascun tematismo (lettera *a* di ciascuna figura) è affiancato, ai fini di permettere un agevole confronto, con il risultato dell'analisi condotta nel 2008 su scala regionale (lettera *b*).

La descrizione dei passaggi intermedi che portano ai risultati che seguono è stata omessa per ragioni di spazio. Una descrizione dettagliata del metodo è tuttavia reperibile in Cazorzi e Mercì (2008).

Dall'osservazione delle carte del Fattore Regimante della Vegetazione (FRV) riportate in Figura 27 si può comprendere come siano rilevanti ai fini dell'analisi della fragilità la qualità e l'attendibilità degli strati informativi di base. Nel caso specifico, le differenze principali sono attribuibili ai diversi tematismi riferiti all'uso del suolo, come si può riscontrare dalle carte presentate in Figura 9.

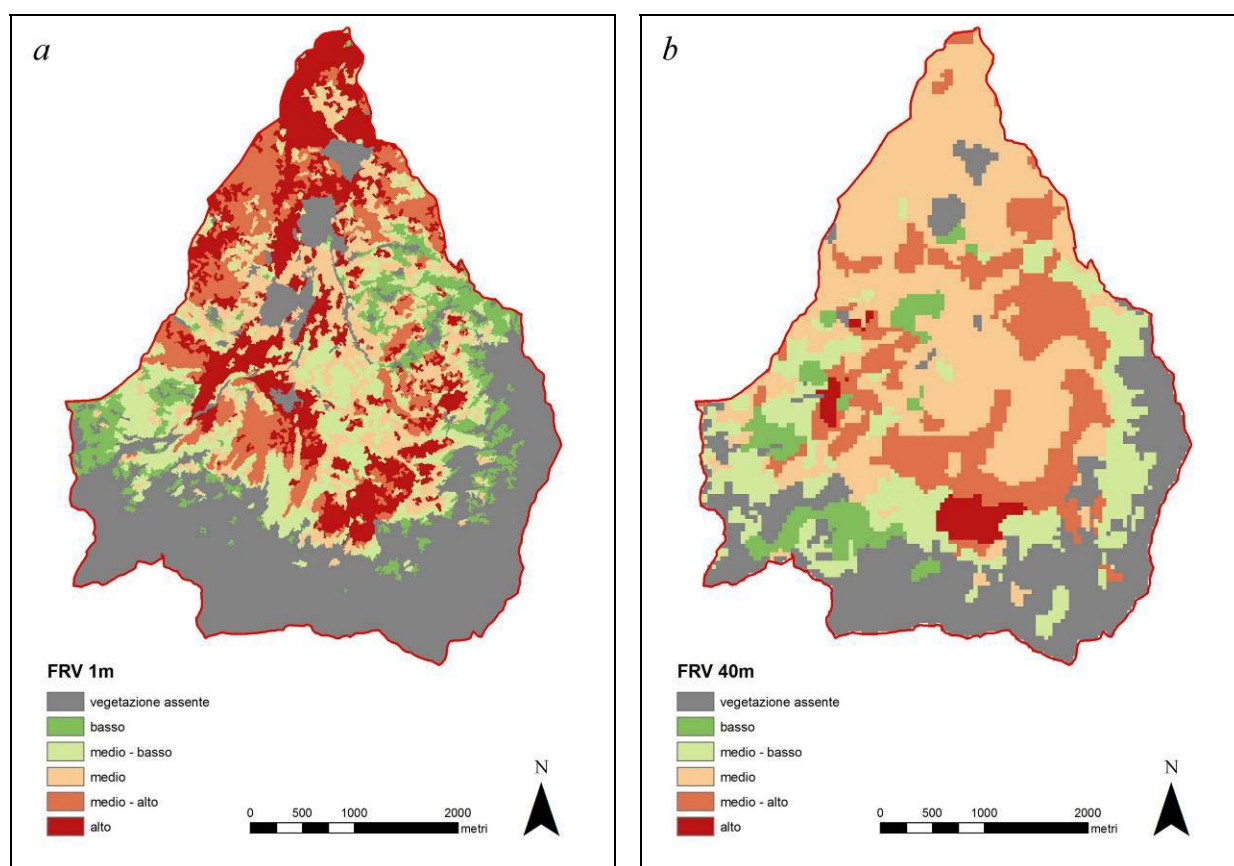


Figura 27: carta del Fattore Regimante della Vegetazione, basata sull'attuale elaborazione dei dati LiDAR (a) e relativa allo studio a scala regionale del 2008 (b).

L'analisi dell'azione stabilizzante dei versanti da parte della vegetazione è sintetizzabile nella carta del Fattore Stabilizzante della Vegetazione (FSV, Figura 28). L'indicatore, calcolato per differenza tra uno scenario che ipotizza l'assenza di vegetazione e la situazione di fatto che considera la presenza delle varie formazioni vegetali, è tanto più elevato quanto maggiore è l'efficacia dei diversi tipi di apparati radicali nel consolidare il suolo sui pendii.

Per poter rendere confrontabile l'analisi attuale basata sui dati LiDAR ad altissima risoluzione con quella condotta a scala regionale nel 2008 è stato modificato nella procedura del software *Fragile!* il parametro *Area di Soglia del Reticolo per il calcolo ASPI* (Indice Adimensionale di Potenza della

Corrente). Il parametro è stato portato dal valore di 40000 m² utilizzato nel calcolo sul DTM alla risoluzione di 40 m al valore di 25 m², dovendo trattare un DTM alla risoluzione di 1 m, con rapporto di superficie pari a 1600:1.

In Figura 29 si può osservare come l'aumento della risoluzione porti ad una migliore individuazione dei processi erosivi a scala di versante.

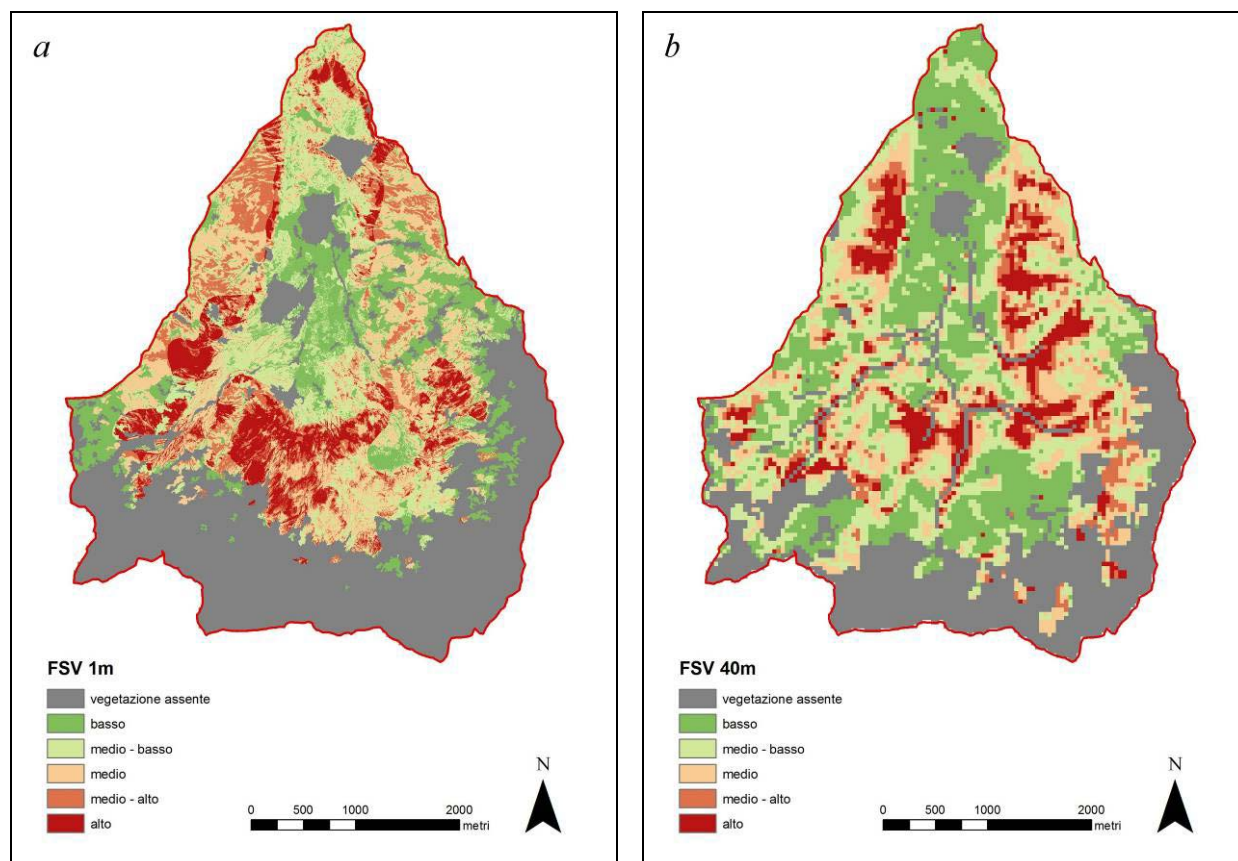


Figura 28: carta del Fattore Stabilizzante della Vegetazione, basata sull'attuale elaborazione dei dati LiDAR (a) e relativa allo studio a scala regionale del 2008 (b).

Il Fattore Protettivo della Vegetazione (FPV) rappresenta infine l'azione protettiva della vegetazione e quindi la sintesi dell'intera metodologia di mappatura della fragilità territoriale. Tale indicatore è ottenuto dalla combinazione dell'azione di regimazione sui deflussi di piena (FRV) con quella di stabilizzazione dei versanti (FSV). I valori più elevati (colore rosso) indicano le porzioni di territorio dove l'azione protettiva della vegetazione è molto elevata; al contrario i valori bassi (colore verde) evidenziano quelle situazioni in cui l'apporto della vegetazione non è particolarmente significativo. Dal calcolo di FPV sono escluse per definizione le aree prive di vegetazione. La sua distribuzione sull'area di studio (considerando i valori di EF ottenuti in questo studio) è riportata in Figura 30.

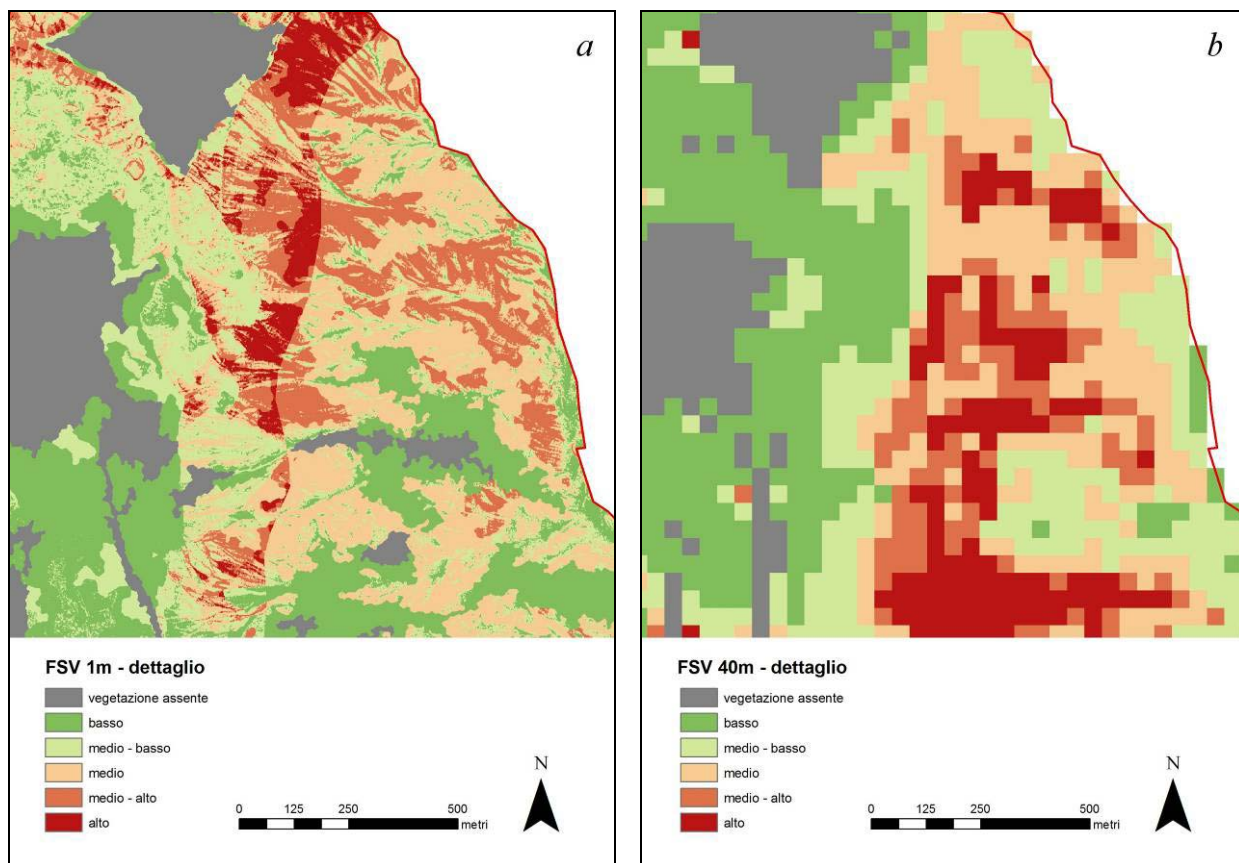


Figura 29: dettaglio delle carte del Fattore Stabilizzante della Vegetazione riportate in Figura 28.

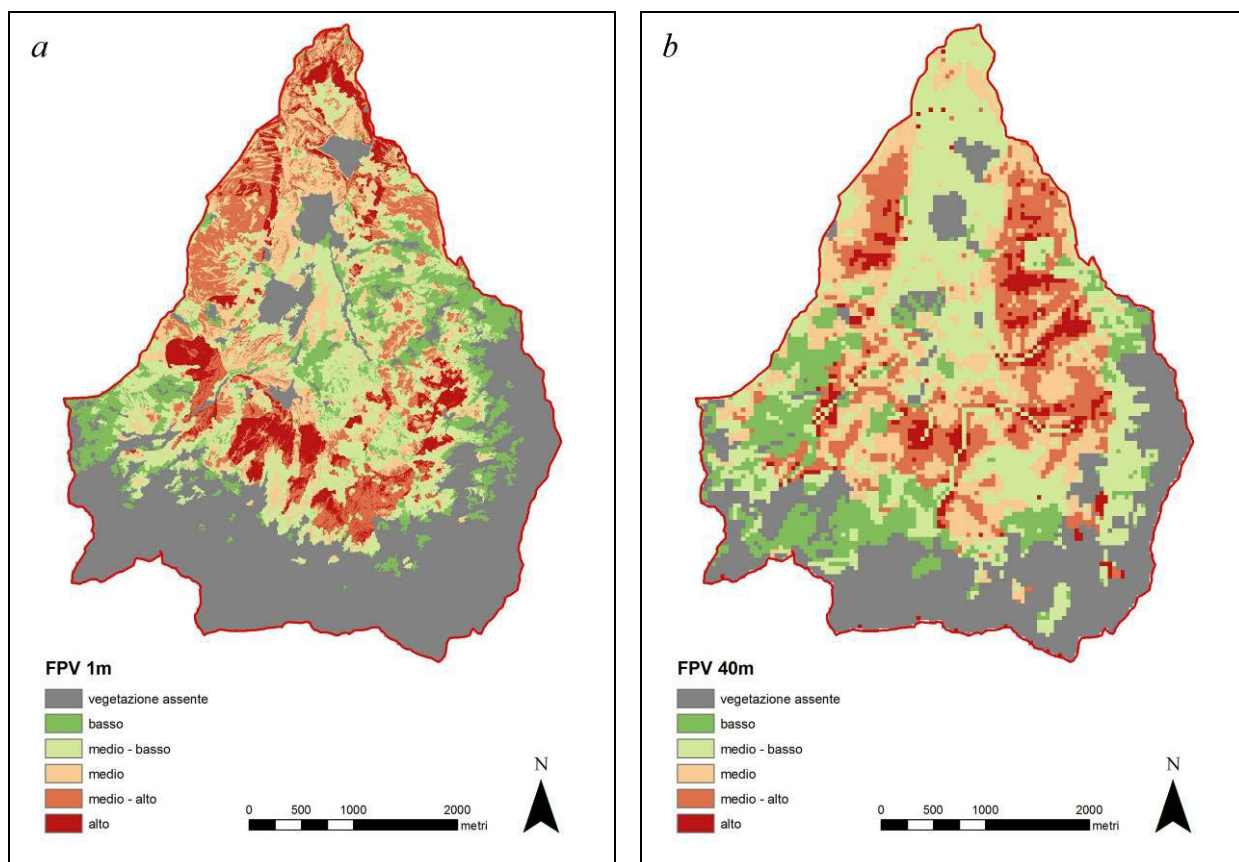


Figura 30: carta del Fattore Protettivo della Vegetazione, basata sull'attuale elaborazione dei dati LiDAR (a) e relativa allo studio a scala regionale del 2008 (b).

4. CONCLUSIONI

I risultati dell'applicazione delle tecnologie LiDAR al monitoraggio ambientale hanno evidenziato le potenzialità di questo strumento nella descrizione dei popolamenti forestali, nella stima del volume e degli stock di carbonio nonché la capacità di discriminare, grazie all'individuazione delle categorie strutturali, gli stadi vegetazionali più maturi e con maggior biodiversità. La sperimentazione condotta nell'area dei laghi di Fusine ha evidenziato l'ottima della tecnologia LiDAR nella descrizione degli usi del suolo prevalenti (arbusteto, bosco, suolo nudo) e la discreta capacità di descrivere le categorie strutturali. In questo caso, le maggiori discordanze sono state rilevate soprattutto per le categorie perticaia e bosco multiplano, mentre il maggior accordo è stato riscontrato per fustaia adulta e fustaia matura. Ciò può essere imputato all'elevata densità dei popolamenti nelle fasi giovanili (spessina e perticaia), alla presenza di piante del vecchio ciclo a causa della forma di trattamento applicata a questi popolamenti (tagli successivi a gruppi) ed alla bassa densità del rilievo LiDAR che non ha consentito di ben individuare gli eventuali piani dominati al di sotto delle piante del vecchio ciclo nelle fasi giovanili. Un ulteriore aspetto da approfondire in studi successivi sarà quello di studiare una metodologia di campionamento a terra che consenta di valutare in maniera più approfondita, in fase di analisi dei risultati, la variabilità intrinseca dei parametri che caratterizzano i popolamenti forestali all'interno dei singoli poligoni strutturali individuati dall'elaborazione dei dati LiDAR (densità, altezze e specie).

L'altezza media derivata dai dati LiDAR si è dimostrata essere un buon estimatore del volume e dello stock di carbonio dei soprassuoli esaminati. Infatti, in entrambi i casi, la correlazione con l'altezza media LiDAR è significativa da un punto di vista statistico secondo un modello d'interpolazione di tipo potenza, come già messo in evidenza in precedenti studi (Saatchi et al., 2011).

Per quanto riguarda gli aspetti ambientali, le fustaie (adulte e mature) presentano un elevato valore naturalistico combinando un alto livello di biodiversità ed un elevato numero di elementi caratteristici. Questo sottolinea la necessità di un' oculata gestione di tali categorie strutturali (Franch et al., 2008; Mihai et al, 2004; Graae & Sunde, 2000). Le cartografie derivate dal LiDAR rappresentano strumenti idonei, se adeguatamente integrati da analisi in campo, adatto per i monitoraggi forestali di tipo ambientale in aree protette o di interesse naturalistico e per l'individuazione a scala regionale di aree forestali di elevato valore naturalistico.

Le criticità nell'applicazione in questo ambito sono legate soprattutto alla complessità di variabili coinvolte nella spazializzazione delle comunità individuate. Per questo si renderebbe necessaria la costruzione di un modello vegetazionale che metta in relazione i dati strutturali e le principali variabili ecologiche di tipo geomorfologico, pedologico e topo climatico.

È stata altresì evidenziata la capacità di individuare le principali tipologie vegetazionali arbustive. In particolare la possibilità di impiego nel monitoraggio di habitat di interesse conservazionistico quali mughete ed arbusteti alpini. Per la distinzione delle singole formazioni è emersa la necessità d'integrazione di modelli distributivi delle varie cenosi individuate durante i rilievi in campo.

In futuro sarebbe necessario poter verificare la validità di questo approccio per altre tipologie forestali, che uniscono alla struttura elevata diversità di composizione ed ecologia.

Infine, per quanto riguarda la fragilità territoriale in ambiente montano, disporre di un DTM ad alta risoluzione, quale quello derivato da dati LiDAR, ha permesso di poter cogliere nel dettaglio la morfologia e la rete idrografica a scala di versante. Tale aspetto potrebbe rappresentare un vantaggio nella modellazione dei processi erosivi laddove vi sia una marcata incisione dei versanti,

situazione in cui un DTM a risoluzione “grossolana” non è in grado di rappresentare con precisione le caratteristiche dell’area.

BIBLIOGRAFIA

- AA.VV., 2002. *“Programma Nazionale Integrato per il Controllo degli Ecosistemi Forestali (CON.ECO.FOR.)”*. Istituto per lo Studio degli Ecosistemi. Verbania Pallanza (Italy).
- ABRAMO E., BARILOTTI A., SEPIC F., 2007. *“Dalla dendrometria diametrica alla dendrometria ipsometrica: stima del volume degli alberi da rilievi laser-scanning”*. Forest@ 4: 373-385.
- BARILOTTI A., 2009. *“Estrazione di parametri inventariali da dati laserscanning in alcune delle foreste regionali del Cansiglio, di Caltea e di Fusine - Relazione Tecnica”*. http://www.regione.fvg.it/rafvfg/export/sites/default/RAFVFG/AT4/ARG4/ARG14/allegati/E-LASER_Relazione_tecnica_primi_risultati_parametri_forestali_FVG.pdf
- BINCOLETTO L., 2006. *“RainMapFVG 2.0. Manuale dell'Utente”*. Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia. Direzione Centrale Risorse Agricole, Naturali, Forestali e Montagna. Servizio Territorio Montano e Manutenzioni.
- BLASONE G., 2010: *“Analisi integrata dell'efficacia della vegetazione nella stabilità del suolo sui versanti”*. Tesi di Laurea Magistrale. Università di Udine.
- BORGA M., DEGLI ESPOSTI S., DALLA FONTANA G., 2005. *“Analisi e sintesi del regime delle precipitazioni intense in Friuli Venezia Giulia”*. In: La prevenzione del rischio idrogeologico nei piccoli bacini montani della regione: esperienze e conoscenze acquisite con il progetto Catchrisk. Regione Friuli Venezia Giulia Direzione Regionale delle Risorse Agricole, Naturali, Forestali e Montagna. Servizio territorio montano e manutenzioni, pp. 75-93.
- BRAUN-BLANQUET J., 1964. *“Pflanzensoziologie – Grundzuge der Vegetationkunde”*. Springer, Wien – New York.
- BROILI L., CARULLI G., MENCHINI G., 1984 (ristampa 2001). *“Cartografia geologico tematica del territorio provinciale. Note illustrative”*. Provincia di Udine.
- CARULLI G.B. (a cura di), 2007. *“Carta geologica del Friuli Venezia Giulia (1:150000) e note illustrative”*. Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, Servizio Geologico.
- CAZORZI F., DALLA FONTANA G., 2005. *“Studio per lo sviluppo di nuovi criteri tecnici e normativi per il riordino del vincolo idrogeologico”*. Università degli Studi di Udine, Dipartimento di Scienze Agrarie ed Ambientali; Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, Direzione Regionale delle Risorse Agricole, Naturali, Forestali e Montagna. Servizio Selvicoltura e Antincendio Boschivo.
- CAZORZI F., DALLA FONTANA G., 2006. *“Fragile! Software per il calcolo della Fragilità Territoriale. Guida di riferimento”*. Università degli Studi di Udine, Dipartimento di Scienze Agrarie ed Ambientali; Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia.
- CAZORZI F., MERCI A., 2008. *“Studio per lo sviluppo di nuovi criteri tecnici e normativi per il riordino del vincolo idrogeologico. Terzo Stralcio Funzionale. Relazione Conclusiva”*. Università degli Studi di Udine, Dipartimento di Scienze Agrarie ed Ambientali; Regione Autonoma Friuli

Venezia Giulia, Direzione Regionale delle Risorse Agricole, Naturali, Forestali e Montagna. Servizio Selvicoltura e Antincendio Boschivo.

CAZORZI F., GOTTARDO E., MERCI A., 2009. “Nuovi criteri per il riordino del vincolo idrogeologico”. In: Rassegna Tecnica del Friuli Venezia Giulia 5, pp. 11-13.

COHEN J., 1960. “A coefficient of agreement for nominal scales”. Educational and Psychological Measurement 20 (1): 37–46.

COMMISSIONE EUROPEA, 2006. “Quadro Comune di Monitoraggio e Valutazione per lo Sviluppo Rurale 2007-2013”. <http://ec.europa.eu/agriculture>

CORSI M., PERONIO M., 1971 (ristampa 1981). “Morfologia geologia idrologia” (pag. 68-70). In “Il parco di Fusine”, Regione Friuli-Venezia Giulia, Azienda delle foreste, stampa: Doretti – Udine.

DEL FAVERO R., POLDINI L., LASSEN C., DREOSSI G., VANONE G., 1998. “La vegetazione forestale e la selvicoltura nella regione Friuli-Venezia Giulia”. Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia, Direzione Regionale delle Foreste, Servizio della Selvicoltura.

DEL FAVERO R., BORTOLI P.L., STAF S.n.C., VANONE G., MORO E., 2000. “Direttive per il piano di gestione delle proprietà forestali nella regione Friuli Venezia Giulia”. Direzione Regionale delle Foreste, Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia: 256 pp.

DEL FAVERO R., 2004. “I boschi delle Regioni Alpine Italiane”. CLEUP: 599 pp.

ELLENBERG H., 1974. “Zeigerwerte der Gefäßpflanzen Mitteleuropas”. Scripta Geobot. 9. Göttingen, 1974. 2. Aufl. (1979). 3. Aufl. (1992) in Ellenberg H. et al., Scripta Geobot. 18: 9-166.

FRENCH L. J., SMITH G. F., KELLY D. L., MITCHELL F. J.G., O'DONOGHUE S., IREMONGER S. F., MCKEE A. M., 2008. “Ground flora communities in temperate oceanic plantation forests and the influence of silvicultural, geographic and edaphic factors”. Forest Ecology and Management 255 (3-4): 476-494.

GRAAE, B. J., SUNDE P. B., 2000. “The impact of forest continuity and management on forest floor vegetation evaluated by species traits”. Ecography 23 (6): 720-731.

HOFMANN A., 1971 (ristampa 1981). “La vegetazione” (pag. 75-77). In “Il parco di Fusine”, Regione Friuli-Venezia Giulia, Azienda delle foreste, stampa: Doretti – Udine.

IEEP, Institute for European Environmental Policy, 2007. “Final report for the Study on HNV indicators for Evaluation”. Report prepared by the Institute for European Environmental Policy for DG Agriculture. <http://www.ieep.eu/>

LANDIS, J.R., KOCH, G.G., 1977. “The measurement of observer agreement for categorical data”. Biometrics 33 (1): 159–174

MARINCEK L., POLDINI L., ZUPANCIC M. 1989. “Beitrag zur kenntniss der Gesellschaft AnemoneFagetum”. Razprave 4, Razreda SAZU: 30(1): 3-64.

MIHAI C., SKEFFINGTON M. S., GILLER P., SMITH C., GORMALLY M., O'DONOVAN G., 2004. “*Vegetation diversity and stand structure in streamside forests in the south of Ireland*”. Forest Ecology and Management: 202 (1-3) (1): 39-57.

MUCINA L., GRABHERR G., WALLNÖFER S., 1993. “*Die Pflanzengesellschaften Österreichs*”. Fischer, Jena.

MUSU F., 1999 (ristampa 2005). “*Aree naturali protette nel Friuli Venezia Giulia*”. Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia. Direzione centrale risorse agricole, naturali, forestali e montagna. Servizio tutela ambienti naturali, fauna e Corpo forestale regionale.

NATURA 2000. Codice Sito IT3320006, “*Conca di Fusine*”, 1995 (aggiornamento 2006). Formulário standard per zone di protezione speciale (zps), per zone proponibili per una identificazione come siti d'importanza comunitaria (sic) e per zone speciali di conservazione (zsc).

OBERDORFER E., 2001. “*Pflanzen-soziologische Exkursions-flora für Deutschland und angrenzende Gebiete*”. Ulmer, Stuttgart.

PIGNATTI S., 1952, 1953. “*Introduzione allo studio fitosociologico della pianura veneta orientale con particolare riguardo alla vegetazione litoranea*”. Arch. Bot., Forlì, 28 (4): 265-329; 29 (2): 65-98; 29 (3): 129-174.

PIGNATTI S., 1982 “*Flora d'Italia*”. 1-3. Edagricole, 2: 474-475, Bologna.

PIGNATTI S., 2005. “*Valori di bioindicazione delle piante vascolari della flora d'Italia*”. Braun-Blanquetia, 39: 3-97.

POLDINI L., NARDINI S., 1993. “*Boschi di forra, faggete e abieteti in Friuli (NE Italia)*”. Studia Geobot. 13: 215-298.

POLDINI L., ORIOLO G., VIDALI M., 2001. “*Vascular flora of Friuli-Venezia Giulia. An annotated catalogue and synonymic index*”. Studia Geobotanica: 21: 3-227.

POLDINI L., ORIOLO G., FRANCESCATO C., 2004. “*Mountain pine scrubs and heaths with Ericaceae in the southeastern Alps*”. Plant Biosystems 138(1): 53-85.

POLDINI L., ORIOLO G., VIDALI M., TOMASELLA M., STOCH F. & OREL G., 2006. “*Manuale degli habitat del Friuli Venezia Giulia. Strumento a supporto della valutazione d'impatto ambientale (VIA), ambientale strategica (VAS) e d'incidenza ecologica (VIEc)*”. Region. Autonoma Friuli Venezia Giulia – Direz. Centrale ambiente e lavori pubblici – Servizio valutazione impatto ambientale, Univ. Studi Trieste – Dipart. Biologia.

POLLI S., 1971 (ristampa 1981). “*Il clima*” (pag. 72-74). In “*Il parco di Fusine*”, Regione Friuli-Venezia Giulia, Azienda delle foreste, stampa: Doretti – Udine.

SHANNON C., WEAVER W., 1949. “*The mathematical theory of communication*”. Urbana, University of Illinois Press.

REGIONE AUTONOMA FRIULI VENEZIA GIULIA. “*Piano di assestamento della foresta regionale di Tarvisio in Valromana*”, validità 1997-2008. Azienda dei parchi e delle foreste regionali.

REGIONE AUTONOMA FRIULI VENEZIA GIULIA, COMUNE DI TARVISIO, 2009. *“Piano regolatore generale comunale. Norme di attuazione”*.

SAATCHI S.S., HARRIS N.L., BROWN S., LEFSKY M., MITCHARD E.T.A., et al., 2011. *“Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents”*. PNAS, 108: 9899-9904.

STEFANINI S., 1980. *“Le opere di sistemazione idraulico-forestale nei bacini imbriferi del F. Fella e del T. Slizza”*. Comunità montana canal del Ferro – val Canale. Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia.

TONOLLI S., DALPONTE M., NETELER M., RODEGHIERO M., VESCOVO L., GIANELLE D., 2011. *“Fusion of airborne LiDAR and satellite multispectral data for the estimation of timber volume in the Southern Alps”* Remote Sensing of Environment, 115: 2486–2498.

TONOLLI S., DALPONTE M., VESCOVO L., RODEGHIERO M., BRUZZONE L., GIANELLE D., 2011. *“Mapping and modeling forest tree volume using forest inventory and airborne laser scanning”*. European Journal of Forest Research: 130, 569-577.

TRISORIO A., 2009. *“Aree forestali ad alto valore naturale Linee metodologiche per la stima delle aree forestali ad alto valore naturale a livello nazionale e regionale”*. Documento realizzato dalla Rete Rurale Nazionale nell’ambito della Task Force Ambiente e Condizionalità, www.politicheagricole.it

WESTHOFF V., VAN DER MAAREL E., 1978. *“The Braun-Blanquet approach”*. In: *“Classification of Plant Communities”* (ed. R.H. Whittaker), 2nd ed., 287-297. Junk, The Hague.