

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali

TESI DI LAUREA IN TECNOLOGIE FORESTALI E AMBIENTALI

COMPARAZIONE TRA STRUMENTI TRADIZIONALI ED APPLICAZIONI PER SMARTPHONE PER LA MISURAZIONE DELL'ALTEZZA DEGLI ALBERI

Relatore:

Prof. Daniele Castagneri

Laureando

Giovanni Busato

Matricola n° 2009581

ANNO ACCADEMICO 2022-2023

Indice

1. RIASSUNTO	5
2. ABSTRACT	6
3. INTRODUZIONE	7
3.1 L'IMPORTANZA DELL'ALTEZZA DENDROMETRICA NEL SETTORE FORESTALE	7
3.2 Applicazioni per smartphone in grado di misurare l'altezza dendrometrica	8
3.2.1 MOTI (MOBILE Timber cruise)	8
3.2.2 Trees	9
3.3 Obiettivi	9
4. MATERIALI E METODI	11
4.1 Strumenti utilizzati	11
4.1.1 Vertex III Transponder T3 v. 2002/09	11
4.1.2 TruPulse 200L	11
4.1.3 Ipsometro Suunto	12
4.1.4 MOTI	12
4.1.5 Trees	13
4.2 Metodo raccolta dei tempi necessari alle misurazioni	13
4.3 Descrizione sito dei rilievi	13
4.4 Scelta dei campioni e modalità di rilievo	17
4.5 Elaborazione dei dati	17
4.5.1 Elaborazione dei dati relativi agli errori intras strumento normali e assoluti (misura della replicabilità)	17
4.5.2 Elaborazione dei dati relativi agli errori interstrumento normali e assoluti (misura dell'accuratezza degli strumenti)	17
4.5.3 Conteggio degli outlier degli errori intra e interstrumento normali e assoluti	18
4.5.4 Elaborazione dei dati relativi ai tempi necessari alle misurazioni	18
I dati relativi ai tempi sono stati copiati su di un foglio Microsoft Excel mantenendoli suddivisi in dieci colonne, ovvero una per la prima misurazione ed una per la seconda, così per ogni strumento. Come nelle altre elaborazioni i quattro campioni sono stati trattati singolarmente.	18
4.5.5 Test statistici su errori assoluti intras strumento, interstrumento e sui tempi	18
5. RISULTATI	19
5.1 Misurazioni di altezze, diametri e tempi	19
5.2 Errori intras strumento normali (replicabilità delle misure)	24
5.3 Errori intras strumento assoluti (replicabilità delle misure)	26

5.4 Errori interstrumento normali (misura dell'accuratezza)	29
5.5 Errori interstrumento assoluti (misura dell'accuratezza)	32
5.6 Tempi necessari alle misurazioni (efficienza degli strumenti)	35
6. DISCUSSIONE	39
6.1 Replicabilità delle misure (errore intrastrumento)	39
6.1.1 MOTI (MOBILE Timber cruise)	39
6.1.2 Trees	39
6.2 Accuratezza degli strumenti (errore interstrumento)	39
6.2.1 MOTI (MOBILE Timber cruise)	40
6.2.2 Trees	40
6.2.3 Bias ed errori soggettivi	41
6.3 Efficienza degli strumenti (tempi necessari ai rilievi)	42
6.4 Influenza di fattori ambientali e pratici nell'utilizzo degli strumenti	42
7. CONCLUSIONI	45
8. BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA	47
9. RINGRAZIAMENTI	48

1. Riassunto

Con la presente tesi si vogliono confrontare le performance degli ipsometri tradizionali con quelle delle applicazioni per smartphone che svolgono la stessa funzione. In particolare, le applicazioni chiamate "Trees" e "MOTI" sono state comparate a tre strumenti tradizionali comunemente usati dai professionisti: TruPulse, Vertex e ipsometro Suunto.

Sono state misurate 100 piante suddivise in quattro sottogruppi di 25 piante l'uno: faggi fuori bosco, faggi dentro bosco, abeti dentro bosco e abeti fuori bosco. Per ogni pianta la misura dell'altezza è stata ripetuta dieci volte, due per ogni strumento. La doppia misurazione permette di stimare l'errore intrastrumento, ovvero la differenza tra le due misurazioni successive. Tramite un cronometro è stato registrato il tempo necessario ad ogni misurazione.

Confrontando i risultati forniti da ogni strumento con la media delle 10 misurazioni effettuate per ogni pianta è stato calcolato l'errore interstrumento. Secondo i risultati così ottenuti è possibile affermare che i tre ipsometri tradizionali forniscono risultati in linea con l'applicazione Trees, mentre l'unico strumento a fornire risultati spiccatamente errati risulta essere l'applicazione MOTI. La media dell'errore assoluto interstrumento nei quattro campioni, espresso in percentuale, equivale al 2,23% per il Suunto, 2,72% per Trees, 2,75% per TruPulse, 2,91% per Vertex e 7,38% per MOTI.

Possiamo quindi affermare che le prestazioni dell'applicazione Trees possano essere considerate alla pari di quelle degli strumenti professionali. Nel caso di MOTI i risultati sono invece molto meno accurati rispetto a quelli forniti dagli altri ipsometri.

Per quanto riguarda l'efficienza Vertex e MOTI richiedono maggiore tempo nella prima delle due misurazioni in quanto è necessario posizionare alla base dell'albero il Transponder nel primo caso e la palina nel secondo. Sulla base di questo gli strumenti in ordine di efficienza sono: TruPulse, Trees, Suunto, Vertex e MOTI.

È quindi possibile sostenere che l'applicazione Trees possa essere considerata come una valida alternativa agli ipsometri tradizionali. MOTI invece risulta essere sia meno efficiente che significativamente meno accurato.

2. Abstract

With this thesis we want to compare the performance of traditional hypsometers with that of smartphone applications to measure tree height. In particular, applications for smartphone "Trees" and "MOTI" were compared to three traditional instruments commonly used by professionals: TruPulse, Vertex and Suunto hypsometer.

We measured 100 trees were measured, divided into four subgroups of 25 plants each: beech trees outside the forest, beeches inside the forest, spruce inside the forest and spruce outside the forest. For each tree the height measurement was repeated ten times, twice for each instrument. A stopwatch recorded the time needed for each measurement. The double measurement is useful for estimating the intra-instrument error that is the difference between the two successive measurements.

By comparing the results provided by each instrument with the average of the 10 measurements made for each plant we obtained the inter-instrument error. According to the results we obtained the three traditional hypsometers provide results in line with the Trees application and the only tool to provide markedly incorrect results is the MOTI application. The average absolute inter-instrument error in the four samples, expressed as a percentage, is 2.23% for Suunto, 2.72% for Trees, 2.75% for TruPulse, 2.91% for Vertex and 7.38% for MOTI. According to the data collected, the performance of the Trees application can be considered on a par with that of professional tools. In the case of MOTI the results are much less accurate than those provided by other hypsometers.

About temporal efficiency, Vertex and MOTI require more time in the first of the two measurements as it is necessary to place the Transponder at the base of the shaft in the first case and the pole in the second. Based on this the tools in order of efficiency are: TruPulse, Trees, Suunto, Vertex and MOTI.

We can therefore say that Trees application can be considered as a valid alternative to traditional hypsometers. MOTI, on the other hand, is both less efficient and significantly less accurate.

3. INTRODUZIONE

3.1 L'IMPORTANZA DELL'ALTEZZA DENDROMETRICA NEL SETTORE FORESTALE

L'altezza dendrometrica, ossia la distanza tra la cima dell'albero ed il colletto è uno dei parametri fondamentali del settore forestale in quanto ha svariati utilizzi per la gestione delle foreste. Infatti, per la stesura di ogni piano di riassetto forestale e per la formulazione di un qualsiasi progetto di taglio, è necessaria una fase di indagine preliminare, nella quale si vadano a svolgere i campionamenti all'interno del popolamento di interesse, con lo scopo di descrivere l'area in oggetto in tutte le sue componenti. In questa fase il parametro dell'altezza è di fondamentale importanza.

Di seguito vengono riportati alcuni esempi di utilizzo di questa misura.

Tramite la formula $g * h * f$ ovvero area basimetrica per altezza dendrometrica per coefficiente di forma possiamo determinare il volume delle singole piante. Si possono poi utilizzare tavole stereometriche a doppia entrata specifiche per il popolamento, per l'area nella quale questo si trova o per la specie in oggetto: tramite diametro e altezza della pianta esse forniscono il volume del fusto.

La misura dell'altezza è necessaria anche per il calcolo dell'altezza dominante, ovvero la media delle altezze delle cento piante ad ettaro con diametro maggiore. Questo parametro è utile in quanto, abbinato all'area basimetrica per ettaro, ci permette di stimare il volume per ettaro tramite le tavole di popolamento.

Nella gestione delle foreste coetanee queste tavole, abbinate al valore di densità per ettaro, ci permettono di dimensionare gli interventi di diradamento in modo da ridurre la mortalità naturale, aumentare la stabilità del popolamento e concentrare la produzione legnosa su un numero inferiore di piante in modo da ricavare assortimenti migliori.

Un altro parametro fondamentale è la statura, ovvero la media delle 3-5 altezze delle piante più alte del popolamento: questo dato ci permette di determinare la fertilità del sito, ovvero la combinazione tra condizioni climatiche e caratteristiche del suolo. Tramite questo parametro possiamo non solo ricavare la produttività del popolamento ma anche dimensionare gli interventi nella gestione delle foreste disetanee.

Per determinare il diametro di una pianta è sufficiente una semplice misurazione diretta attraverso un cavalletto dendrometrico all'altezza di un metro e trenta da terra, mentre la determinazione dell'altezza dendrometrica richiede più attenzione in quanto, su piante in piedi, deve essere determinata in modo indiretto attraverso ipsometri elettronici o meccanici. Questi strumenti vanno a misurare la distanza tra il colletto e l'apice della pianta e funzionano principalmente tramite due principi differenti: il principio trigonometrico per il quale in un triangolo retto la misura di un cateto (altezza dell'albero) corrisponde alla lunghezza dell'altro (distanza albero-operatore) moltiplicata per la tangente dell'angolo opposto al primo cateto (Figura 3.1), mentre per il secondo principio non è necessario conoscere la distanza tra operatore e albero ma serve una palina di altezza nota appoggiata all'albero che funge da proporzione per determinare l'altezza totale dell'albero (Figura 3.2).

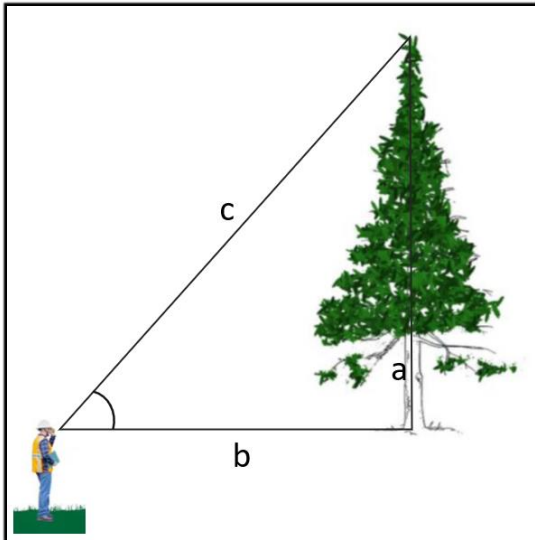


Figura 3.1 Funzionamento ipsometro tramite principio trigonometrico.

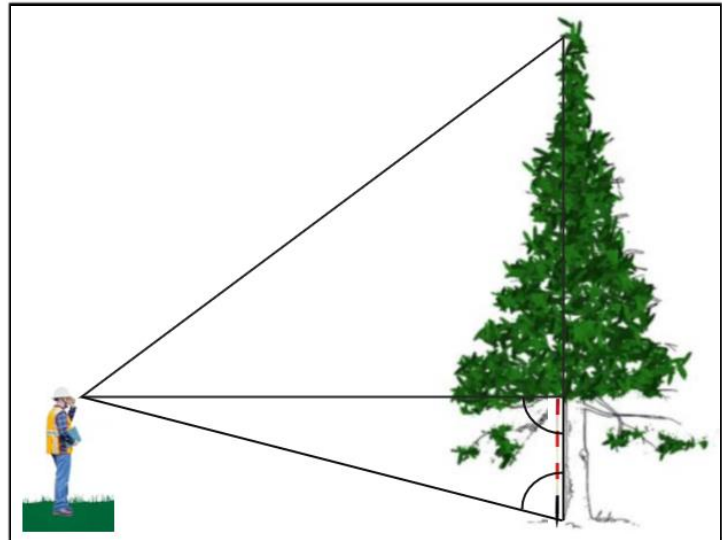


Figura 3.2 Funzionamento di un ipsometro con palina.

La fase di indagine preliminare deve essere svolta da un Dottore agronomo forestale per il quale il D.M. 478/1997 prevede un compenso orario di €56,81 per le ore spese in campo e di €28,41 per le ore impiegate in trasferimenti. In queste operazioni l'efficienza è quindi di estrema importanza per l'abbattimento dei costi e la scelta degli strumenti da utilizzare nell'indagine è fondamentale per questo scopo.

3.2 Applicazioni per smartphone in grado di misurare l'altezza dendrometrica

Da alcuni anni sono disponibili gratuitamente diverse applicazioni utili alla misurazione dei vari parametri dendrometrici, tra i quali l'altezza delle piante, che rispetto agli strumenti tradizionali hanno il pregio di non richiedere un cospicuo investimento. Ad esempio, TruPulse ha un costo che varia a seconda del modello da diverse centinaia di euro ad alcune migliaia di euro, mentre il Vertex di alcune migliaia. Nella presente tesi andremo a considerare due di queste applicazioni: MOTI e Trees.

3.2.1 MOTI (MOBILE Timber cruise)

MOTI è disponibile dal 2013 per dispositivi Android e dal 2015 per iOS (link al sito: <http://www.moti.ch/drupal/?q=it>), nasce da un progetto di ricerca dell'Università professionale di scienze agrarie, forestali e alimentari di Berna. Finanziata dal fondo svizzero per la ricerca forestale e del legno, dai cantoni di Friburgo, Grigioni, Lucerna, Ticino, Vaud, Vallese e Zurigo. In particolare, a lavorare al progetto sono stati il capo progetto Prof. Dr. Christian Rosset (HAFL), i collaboratori Roland Brand, Dominique Weber, Clotilde Gollut, Eric Willemin, Aaron Schmocker ed Iris Caillard (HAFL), l'esperto in informatica Prof. Dr. Ulrich Fiedler (BFH-TI), l'esperto in auxologia Prof. Dr. Jean-Philippe Schutz e l'esperto in inventari forestali Adrian Lanz (WSL).

Tramite questa applicazione è possibile svolgere singole misurazioni o creare inventari forestali memorizzati automaticamente dall'applicazione e non richiede l'accesso ad internet, caratteristica fondamentale per uno strumento forestale.

MOTI è disponibile in quattro lingue: il tedesco, il francese, l'inglese e l'italiano e permette di determinare le principali misurazioni relative al soprassuolo forestale, ovvero l'area basimetrica ad ettaro (con lo stesso principio sfruttato dai relascopi tradizionali), il numero di piante ad ettaro, il volume cormometrico e l'altezza dendrometrica.

3.2.2 Trees

L'app Trees è invece disponibile per Android dal 2019 esclusivamente in lingua inglese mentre non è disponibile per dispositivi iOS. Fa parte di un gruppo di applicazioni chiamate Forest Monitoring Tools (link al sito: <https://sites.google.com/view/forestmonitoringtools/home>) sviluppate da Yuzuru Kimura. Yuzuru Kimura ha lavorato come funzionario del governo giapponese all'interno del MAFF (Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries) a partire dal 1985, ha lavorato per la Japan International Cooperation Agency in Myanmar dove ha tenuto il corso di inventari forestali. Lo sviluppo di "Trees" è nato dalla richiesta di uno studente di avere un'applicazione che fosse in grado di misurare l'altezza delle piante. In seguito, con l'aiuto di altri sviluppatori ed esperti del settore, la stessa è stata migliorata e sono state sviluppate diverse altre applicazioni, ognuna delle quali adibita alla misurazione di uno dei parametri del soprassuolo forestale.

Trees è unicamente dedicata alla misurazione dell'altezza dendrometrica e, come MOTI, non necessita dell'accesso ad internet per poter essere utilizzata. È inoltre possibile memorizzare ogni misurazione effettuata in un file csv nel quale possono venire registrate le altezze misurate, la posizione gps, la specie della pianta ed il diametro.

3.3 Obiettivi

Poiché la misurazione dell'altezza dendrometrica è fondamentale in tutte le operazioni di monitoraggio e gestione delle foreste, il professionista deve essere in grado di ottenere misurazioni accurate. Questo dipende sia dall'esperienza dell'operatore, come evidenziato dagli studi di Kitahara (Kitahara et al., 2010) che dallo strumento che viene utilizzato.

L'obiettivo di questa tesi è quello di valutare se l'accuratezza e l'efficienza delle applicazioni "MOTI" e "Trees" siano comparabili a quelle ottenute dagli ipsometri elettronici e meccanici tradizionali, in modo da determinare se queste applicazioni possano o meno essere delle valide alternative agli strumenti tradizionali.

In particolare, sono state confrontate le due applicazioni sopra citate con il Vertex III Transponder T3 v. 2002/09, con il TruPulse 200L e con l'ipsometro di Suunto. La comparazione tra i cinque ipsometri è svolta in base alla loro:

- replicabilità, ovvero la variabilità delle osservazioni fatte dallo stesso strumento sulla stessa pianta;
- accuratezza, ovvero la distanza delle osservazioni fatte rispetto al valore di riferimento;
- efficienza, in particolare il tempo necessario per effettuare ogni misurazione per ciascuno strumento.

4. MATERIALI E METODI

4.1 Strumenti utilizzati

4.1.1 Vertex III Transponder T3 v. 2002/09

Il Vertex è un ipsometro che funziona ad ultrasuoni composto da due strumenti:

- l'ipsometro, che riceve gli ultrasuoni, misura gli angoli, le distanze e calcola le altezze;
- il Transponder che emette gli ultrasuoni.

Come descritto all'interno del manuale per l'utilizzo dello strumento (Vertex III and Transponder T3 manual, Revised September 2005 v.1.4) per misurare l'altezza di una pianta occorre posizionare il Transponder sul fusto della pianta in questione ad un'altezza di 1,3 m (modificabile tramite le opzioni dello strumento). Dopo aver acceso Vertex e Transponder bisogna selezionare la modalità "height", allontanarsi fino ad una distanza all'incirca pari all'altezza dell'albero e trarre il Transponder, tenere premuto il tasto ON fino a quando la croce di colore rosso non scompare temporaneamente, a questo punto distanza e angolo tra strumento e transponder sono stati misurati. Fatto questo bisogna trarre la punta dell'albero e tenere nuovamente premuto il tasto ON fino a quando la croce non scompare nuovamente. A questo punto l'altezza dell'albero è stata misurata ed appare sullo schermo a lato dello strumento.

Poiché questo strumento funziona ad ultrasuoni, le condizioni meteo come temperatura, umidità e pressione atmosferica alterano i risultati. Per questo motivo è necessaria una frequente calibrazione dell'ipsometro. Per fare ciò occorre attendere almeno 10 minuti per far sì che lo strumento raggiunga la temperatura ambientale, quindi si misura una distanza di 10 metri con una cordella metrica, si posiziona il transponder ad un estremo ed il Vertex all'altro, si seleziona la modalità "Calibrate", si punta la croce verso il transponder e si tiene premuto il tasto ON fino a quando la croce non scompare. A questo punto lo strumento sarà calibrato.

4.1.2 TruPulse 200L

Il TruPulse è invece un ipsometro che funziona tramite un distanziometro laser a lunga portata, un sensore di inclinazione ed un processore. È composto da un singolo strumento che emette e riceve il raggio laser. Funzionando a laser non risente delle condizioni meteorologiche o ambientali e non richiede quindi calibrazione. Presenta però degli svantaggi: nel caso in cui siano presenti ostacoli tra strumento e albero, esso non sarà in grado di fornire la misurazione corretta della distanza perché, a differenza di uno strumento funzionante ad ultrasuoni, non è in grado di superare piccoli ostacoli come possono essere delle foglie o arbusti di sottobosco. Il raggio laser, infatti, rileva la superficie più vicina, ovvero la prima a riflettere il raggio emesso.

Come descritto nel manuale per l'utilizzo dello strumento (Laser Technology, Inc. TruPulse® 200L User's Manual, 2013) per misurare l'altezza di un albero occorre mirare al tronco ad una qualsiasi altezza e premere il tasto tondo per misurare la distanza, poi mirare prima alla base e poi alla cima del tronco premendo lo stesso tasto entrambe le volte in modo da misurare i due angoli.

A questo punto lo strumento calcolerà l'altezza, visibile all'interno del mirino dello strumento.

È quindi necessario che sia la base che la cima dell'albero siano visibili, nel caso del Vertex non era necessario che la base lo fosse.

4.1.3 Ipsometro Suunto

L'ipsometro di Suunto è uno strumento analogico con costo contenuto. Essendo analogico funziona a distanze prefissate: possiede infatti due scale ipsometriche corrispondenti alle distanze di 15 e 20 metri dalla pianta in oggetto. È inoltre possibile utilizzare lo strumento a distanze multiple dei valori indicati, con l'accortezza di moltiplicare anche le misure così ricavate. Ad esempio, possiamo posizionarci ad una distanza di 30 metri ed utilizzare la scala corrispondente ai 15 metri moltiplicando per due le misure ricavate.

Come descritto nel manuale dello strumento (Suunto precision instruments user guide, suunto.com/Support/User-guides/Suunto-PM-5/6386) per misurare un'altezza è necessario posizionarsi ad una distanza all'incirca pari all'altezza della pianta stessa. Nel nostro caso è stato utilizzato il TruPulse per determinare questa misura. Attraverso il foro obiettivo traggiamo la cima della pianta, inclinando lo strumento le scale ipsometriche ruotano, andiamo quindi a leggere la misura restituita dalla scala da noi utilizzata determinando così a1. Ripetiamo la procedura traggendo la base della pianta e determinando a2. L'altezza totale dell'albero è data dalla somma di a1 e a2 come illustrato nella Figura 4.1.

4.1.4 MOTI

MOTI è un'applicazione gratuita (Figura 4.1) per dispositivi mobili sviluppata dai ricercatori dell'Università di Berna, che permette di eseguire diverse misurazioni riguardanti il soprassuolo forestale come: l'area basimetrica, l'altezza delle piante e la provvigione.

Per determinare l'altezza di una pianta, come descritto nel sito dell'applicazione (<http://www.moti.ch/drupal/?q=it/node/41>) e nell'applicazione stessa, bisogna prima posizionare verticalmente vicino al tronco una palina lunga all'incirca un decimo dell'altezza totale della pianta. A questo punto dall'applicazione si mirerà prima alla base della pianta, poi all'apice superiore della palina ed infine alla cima dell'albero.

Ora l'applicazione calcolerà in automatico l'altezza dendrometrica.

In questo caso il principio di funzionamento è differente da quello degli altri ipsometri, in quanto non viene utilizzata la distanza dall'albero per determinarne l'altezza, ma vengono utilizzati l'altezza della palina e gli angoli tra base e cima della palina e tra cima della palina e cima dell'albero.

Per ottenere dei risultati il più accurati possibile è necessario calibrare l'applicazione prima dell'utilizzo nel modo indicato dagli sviluppatori. Questa operazione deve essere svolta una sola volta.



Figura 4.1: schermata rappresentante l'interfaccia dell'applicazione MOTI

4.1.5 Trees

Trees è un'applicazione per cellulari e tablet totalmente gratuita, ma disponibile esclusivamente in inglese in grado di misurare l'altezza delle piante (Figura 4.2).

A differenza di Moti funziona in modo del tutto analogo agli altri ipsometri utilizzati. Per calcolare l'altezza della pianta, come specificato all'interno dell'applicazione stessa e nel sito internet (<https://sites.google.com/view/forestmonitoringtools/home>), necessita che venga fornita la distanza tra punto di rilievo e base della pianta. Si può fornire direttamente la distanza topografica oppure la distanza reale che l'applicazione andrà a convertire in automatico in distanza topografica tramite l'angolo rilevato alla base dell'albero. Occorre poi mirare alla base ed alla cima dell'albero, in questo modo, tramite l'accelerometro del cellulare, vengono determinati i due angoli in questione.

Nel nostro caso la distanza dalla pianta è stata determinata utilizzando il distanziometro laser del quale è dotato il TruPulse 200L. Anche in questo caso lo strumento farà in automatico il calcolo per determinare l'altezza della pianta.

A differenza di Moti questa applicazione non deve essere calibrata.

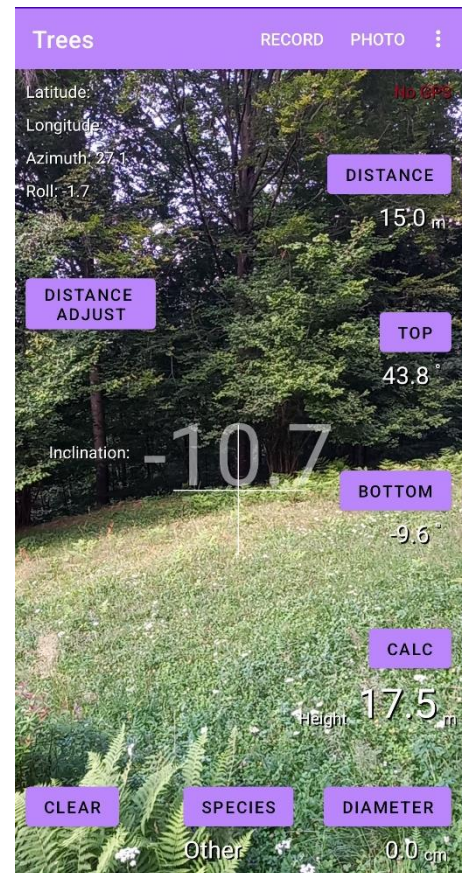


Figura 4.2: Schermata rappresentante l'interfaccia dell'applicazione Trees.

4.2 Metodo raccolta dei tempi necessari alle misurazioni

Con lo scopo di confrontare l'efficienza dei vari strumenti è stato misurato il tempo necessario ad ogni rilevamento. Per la misurazione dei tempi è stato utilizzato un cronometro.

Le misurazioni dei tempi tengono conto di tutto il tempo necessario alla procedura di rilievo dell'altezza, comprendono quindi il tempo per il posizionamento del Transponder nel caso di Vertex e per il posizionamento della palina nel caso di Moti.

Non tengono invece conto del tempo necessario alla trascrizione dei risultati sul foglio di campo.

4.3 Descrizione sito dei rilievi

Le aree dove si sono svolti i rilievi sono situate a Recoaro Mille (Figura 4.3), frazione di Recoaro Terme (VI). Per questo studio è stato necessario individuare aree con condizioni differenti:

- la presenza di latifoglie e conifere;
- la presenza di piante fuori bosco, quindi isolate o al margine del bosco;
- la presenza di piante dentro bosco.

La zona scelta è parte di un comprensorio turistico utilizzato anche per la produzione di legname e, per questi motivi, presenta popolamenti puri di faggio (Figure 4.4 e 4.6) e popolamenti di origine antropica di abete rosso (Figure 4.5 e 4.7). Sono inoltre presenti diverse aree tenute a pascolo a scopo turistico: in queste sono quindi presenti diverse piante fuori bosco.

Le varie aree di rilievo rappresentate in Figura 1 sono situate ad altitudini che variano da un minimo di 970 m.s.l.m. fino ad un massimo di 1040 m s.l.m. con esposizione ad est. La pendenza massima alla quale sono stati effettuati i rilievi corrisponde al 15%, mentre la maggior parte delle misurazioni sono state realizzate su terreno pianeggiante.

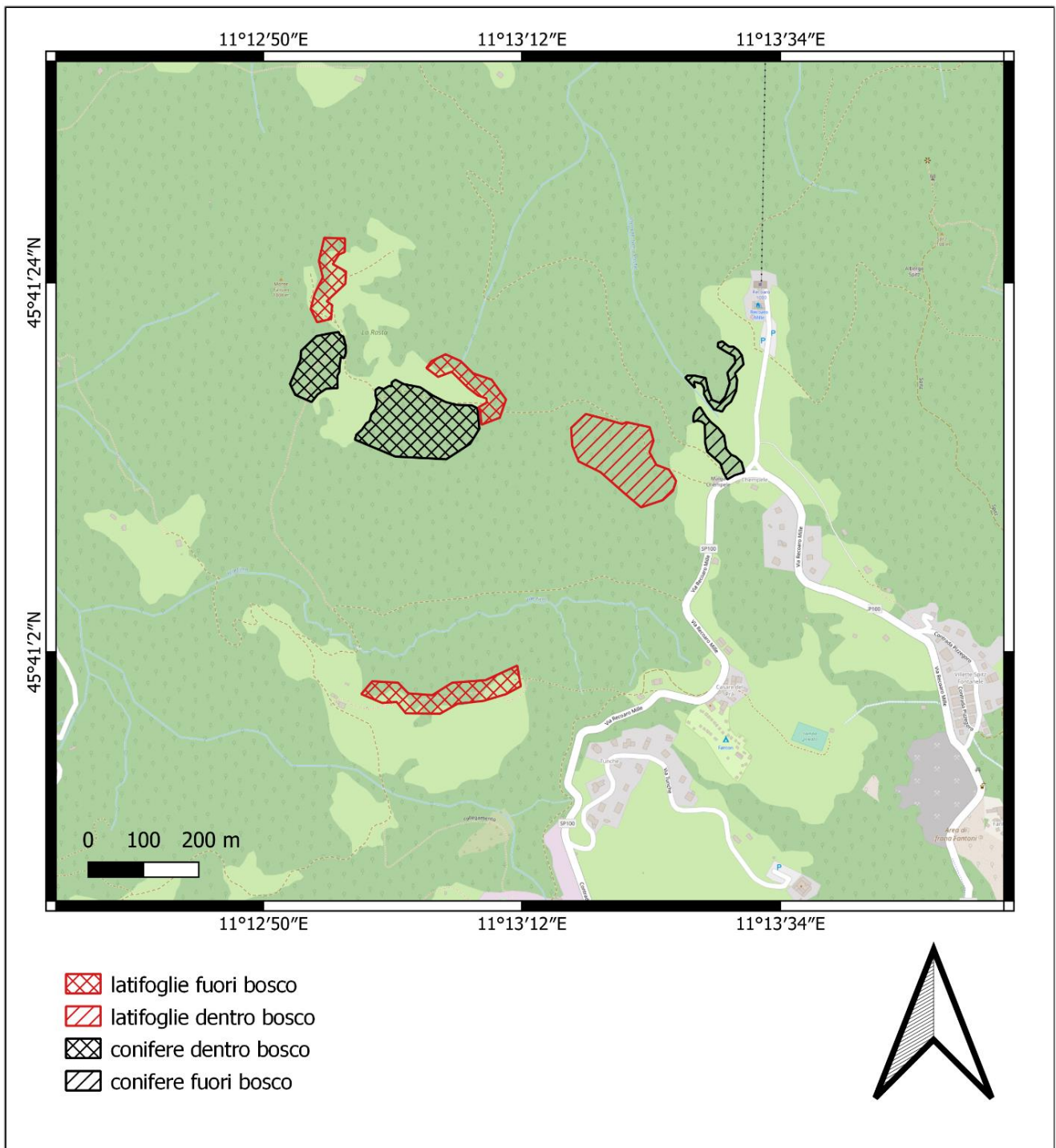


Figura 4.3: Mappa raffigurante le aree dei rilievi suddivise per tipo. Le aree con popolamenti di faggio sono evidenziate in rosso mentre le aree con boschi di abete rosso sono evidenziate in nero.



Figura 4.4: Foto di faggeta dove sono stati svolti i rilievi su piante dentro bosco.

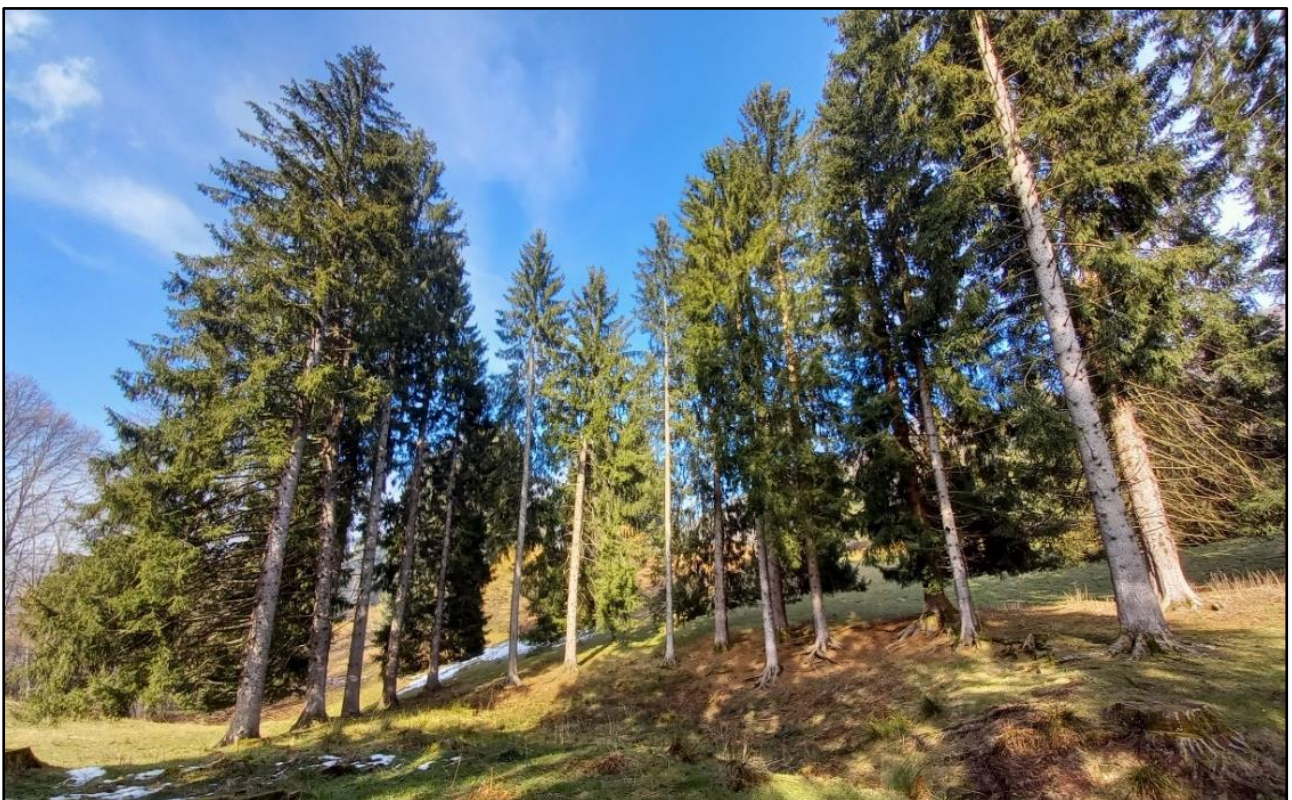


Figura 4.5: Foto raffigurante uno dei siti dove sono state raccolte le misure su abete rosso fuori bosco.



Figura 4.6: Foto di faggeta nella quale sono stati svolti i rilievi su piante dentro bosco.



Figura 4.7: Foto di pecceta nella quale sono stati svolti i rilievi su abete rosso dentro bosco.

4.4 Scelta dei campioni e modalità di rilievo

Sono stati misurati un totale di 100 alberi suddivisi in 2 gruppi. Il primo consiste in 50 conifere ed il secondo in 50 latifoglie. Le conifere misurate sono abeti rossi (*Picea abies*) mentre le latifoglie sono faggi (*Fagus sylvatica*). Sono state scelte queste specie in quanto, nell'ambito produttivo e di gestione forestale, sono tra le più importanti e rappresentative a livello europeo.

Ognuno dei due gruppi è stato a sua volta suddiviso in due sottogruppi, composti da 25 piante fuori bosco e 25 piante in bosco.

I faggi sono stati misurati durante la stagione vegetativa, dunque con presenza di foglie.

La decisione di suddividere la ricerca in vari sottogruppi di conifere e latifoglie e tra dentro bosco e fuori bosco è stata presa per poter confrontare le prestazioni dei vari ipsometri in condizioni differenti e rappresentative di quello che potrebbe essere uno scenario reale.

L'altezza di ogni pianta è stata misurata due volte con ogni ipsometro utilizzato, per un totale di dieci misurazioni per albero, con l'accortezza di fare ogni misurazione da una posizione diversa e cambiando l'ordine di utilizzo degli ipsometri per ogni pianta. Queste accortezze sono state prese con l'obiettivo di ridurre l'errore e la distorsione legati all'operatore, che può essere condizionato dal rilievo fatto con lo strumento precedente.

4.5 Elaborazione dei dati

4.5.1 Elaborazione dei dati relativi agli errori intrastrumento normali e assoluti (misura della replicabilità)

Per ottenere l'errore intrastrumento normale è stato necessario trascrivere le misurazioni delle altezze in un foglio di Microsoft Excel mantenendole suddivise nei quattro campioni e in dieci colonne, in modo da tenere divise le due misurazioni fatte con ogni strumento.

A questo punto, per ogni ipsometro, il valore della seconda rilevazione (H_2) è stato sottratto al valore della prima (H_1) ottenendo così l'errore intrastrumento normale (E_{in}). L'errore intrastrumento assoluto (E_{ia}) corrisponde invece al modulo dell'errore intrastrumento normale.

Per ognuno dei quattro campioni (abeti fuori bosco, abeti dentro bosco, faggi fuori bosco e faggi dentro bosco) sono state misurate media e deviazione standard degli errori intrastrumento.

Errore intrastrumento normale: $E_{in} = H_1 - H_2$

Errore intrastrumento assoluto: $E_{ia} = |E_{in}|$

4.5.2 Elaborazione dei dati relativi agli errori interstrumento normali e assoluti (misura dell'accuratezza degli strumenti)

Il primo passaggio necessario per il calcolo dell'errore interstrumento è la stima l'altezza che consideriamo come riferimento (H_r), ovvero la media delle dieci misurazioni effettuate su ogni pianta. Non potendo conoscere la reale altezza dell'albero, la sua stima più verosimile è appunto la media ottenuta dalle 10 misurazioni. L'errore per ogni misurazione (E) viene calcolato sottraendo ad ogni altezza misurata (H_m) l'altezza corretta (H_r). Anche in questo caso per ognuno dei quattro campioni sono state misurate media e deviazione standard degli errori.

Errore: $E = H_m - H_r$

Gli stessi errori sono stati calcolati in percentuale ($E\%$) tramite la seguente formula:

$$E\% = \left(\frac{H_m - H_r}{H_c} \right) \times 100$$

4.5.3 Conteggio degli outlier degli errori intra e interstrumento normali e assoluti

Gli outlier sono stati ricercati sia sugli errori intrastrumento normali sia su quelli assoluti.

Per il primo caso è stata calcolata la deviazione standard tra gli errori normali di tutte le misurazioni all'interno dello stesso campione di alberi mantenendo quindi la suddivisione tra abeti fuori e dentro bosco e faggi fuori e dentro bosco. Sono poi stati conteggiati tutti gli errori intrastrumento maggiori del doppio della deviazione standard o inferiori del doppio della deviazione standard con segno negativo per ognuno dei cinque strumenti.

Per il conteggio degli outlier all'interno degli errori intrastrumento assoluti è stata seguita una procedura simile con l'unica differenza che la deviazione standard è stata calcolata tra tutti gli errori intrastrumento assoluti all'interno dello stesso campione di alberi.

Il medesimo procedimento è stato seguito per la ricerca degli outlier presenti tra gli errori interstrumento (E) al capitolo 4.5.2.

4.5.4 Elaborazione dei dati relativi ai tempi necessari alle misurazioni

I dati relativi ai tempi sono stati copiati su di un foglio Microsoft Excel mantenendoli suddivisi in dieci colonne, ovvero una per la prima misurazione ed una per la seconda, così per ogni strumento. Come nelle altre elaborazioni i quattro campioni sono stati trattati singolarmente.

Sono poi state calcolate la media e la deviazione standard per ognuna delle colonne, la media è stata rappresentata in un istogramma con barre di errore rappresentanti la deviazione standard.

4.5.5 Test statistici su errori assoluti intrastrumento, interstrumento e sui tempi

Per valutare se gli errori assoluti, sia intrastrumento che interstrumento, calcolati per ognuno degli strumenti fossero statisticamente differenti tra di loro è stato applicato il test statistico di Kruskal-Wallis, un test non parametrico per valutare le differenze tra campioni. Per fare ciò è stato utilizzato il software Past (Hammer et al. 2001) nel quale sono stati inseriti gli errori assoluti suddivisi in cinque colonne, una per strumento. Tale test pone come ipotesi nulla che gli errori assoluti di tutti e cinque gli strumenti appartengano alla stessa popolazione statistica. Nel caso in cui questo test fornisca un risultato significativo, l'ipotesi nulla viene rigettata e si procede con l'effettuare i test post-hoc di Dunn. In questo modo si vanno a confrontare a coppie tutti i campioni e si può verificare quali siano diversi tra loro. Nel caso in cui il p-value sia inferiore a 0,05 i due campioni vengono considerati statisticamente differenti.

La medesima procedura è stata seguita per confrontare i dati relativi ai tempi necessari alle misurazioni considerando la prima e la seconda misura effettuate con ogni strumento come campioni diversi per un totale di 10 campioni (2 per ognuno dei 5 strumenti).

5. RISULTATI

5.1 Misurazioni di altezze, diametri e tempi

I dati relativi ad altezze, diametri e tempi sono stati suddivisi in due tabelle differenti per ogni campione. La prima tabella riporta le misurazioni del diametro delle piante in centimetri e delle altezze effettuate con ogni strumento espresse in metri. È da notare che la risoluzione del Vertex e delle applicazioni MOTI e Trees è del decimo di metro, mentre del Suunto è di mezzo metro. Per il TruPulse la risoluzione decimetrica richiede un tempo di rilievo leggermente più lungo e quindi è stata spesso usata la risoluzione metrica. Ad esempio, con la dicitura Trup1 si indica la prima delle misurazioni condotte con TruPulse mentre con Trup2 la seconda. La seconda tabella riporta invece i tempi necessari alle varie misurazioni suddivisi per colonne con lo stesso metodo seguito per la prima tabella.

All'interno della tabella 5.1.1 sono riportate le prove di misurazione delle altezze condotte sulle 25 piante di abete rosso fuori bosco. I diametri di queste variano da un minimo di 49 ad un massimo di 92 centimetri. Le altezze vanno invece da un minimo di 23 ad un massimo di 38,9 metri.

Nella tabella 5.1.2 sono riportati i tempi necessari alle misurazioni delle altezze e questi variano da un minimo di 18 ad un massimo di 90 secondi.

Per quanto riguarda gli abeti in bosco (Tabella 5.1.3) il diametro inferiore è di 27 cm mentre il maggiore di 59 cm. L'altezza più alta registrata è di 36,1 m, mentre la più bassa di 19 m. Per quanto riguarda i tempi (Tabella 5.1.4), il più lungo corrisponde a 81 s e il più breve a 12 s, le ultime cinque righe (corrispondenti alle ultime cinque piante) non tengono conto del tempo necessario al posizionamento della palina e del transponder in quanto era presente un secondo operatore).

Relativamente ai faggi fuori bosco (Tabella 5.1.5) il diametro inferiore corrisponde a 30 cm mentre il maggiore a 73 cm. L'altezza maggiore misurata è pari a 35,7 m mentre quella inferiore è di 13,8 m. Il tempo più lungo registrato (Tabella 5.1.6) all'interno di questo campione è di 61 s mentre il più breve di 9 s. Le prime sei righe non tengono conto del tempo necessario al posizionamento del transponder e in nessuna riga si tiene conto del tempo necessario al posizionamento della palina nell'utilizzo di MOTI.

Per quanto concerne i faggi in bosco (Tabella 5.1.7) il maggior diametro misurato è pari a 46 cm e quello inferiore a 19 cm. L'altezza più alta registrata corrisponde a 37,8 m mentre la minore a 16 m. Il tempo (Tabella 5.1.8) più lungo cronometrato è di 62 s e il più breve di 12 s. Anche in questo caso alla colonna MOTI1 non viene tenuto conto del tempo necessario al posizionamento della palina.

Abeti fuori bosco											
Altezze (m)											
Specie	Diam (cm)	Vertex 1	Vertex 2	Trup 1	Trup2	Suunto 1	Suunto 2	MOT11	MOT12	Trees 1	Trees 2
<i>Picea abies</i>	89	31,2	29,4	26	30	30	30,2	30,3	30,4	30,2	29,4
<i>Picea abies</i>	64	31,4	24,6	31,4	30	31	31,5	31,9	31,8	30,7	30,8
<i>Picea abies</i>	56	29,8	29,4	28	28	27,5	27	30	26,8	27,6	27,9
<i>Picea abies</i>	70	28,8	27,3	28	28	28,5	28,5	29,2	29,6	27,2	27,5
<i>Picea abies</i>	72	31,4	31,2	30,1	32	31	30	27,7	31,8	29,3	29,2
<i>Picea abies</i>	68	31	34,2	28,9	29	29	29	28,8	30,9	28,8	29,9
<i>Picea abies</i>	65	36,2	36,4	35,6	35	35,5	35,5	35,8	42,2	32,8	34,4
<i>Picea abies</i>	86	38,9	36,8	35,1	38	38	39	36,4	33,4	35,6	36,2
<i>Picea abies</i>	78	35,9	36,7	36	36	37	37	35,6	39,3	32,9	33,6
<i>Picea abies</i>	64	25,4	26,6	23	24	25,5	25,5	28	26,3	23,3	23,8
<i>Picea abies</i>	57	34,7	34,1	34	33	34,5	35	35	38,6	33,1	33
<i>Picea abies</i>	73	29,9	28,1	28	29	28,5	29	27,7	27,3	27,5	27,9
<i>Picea abies</i>	56	32,5	29,4	31	32	32	33	32,3	36,1	30,9	30
<i>Picea abies</i>	73	31,3	31,9	30	30,5	30	31	31,6	32	30,8	30,2
<i>Picea abies</i>	51	34,1	33,9	32	31,5	32	31	32,8	36,9	32,5	31,9
<i>Picea abies</i>	57	38,4	32,9	37	38	36,5	37	38,7	35,3	33,9	36,7
<i>Picea abies</i>	49	34,3	35,5	34	33	34	33	36,3	37,3	32,7	32,6
<i>Picea abies</i>	68	35,3	35,2	35	35	35	35,5	36,1	35,2	34,5	33,9
<i>Picea abies</i>	76	38,4	39,7	39	39	38,5	38,5	38,2	37	38,5	37,7
<i>Picea abies</i>	92	34,7	34,6	34	33	34	34,5	36,5	32,9	32,8	33,2
<i>Picea abies</i>	54	26,5	26	26	26	25	25,5	27,2	28,4	24,7	25,1
<i>Picea abies</i>	54	32	32,5	30	31	31	30,5	34,4	31,6	31,1	31,7
<i>Picea abies</i>	75	34,6	34,4	33	33	32,5	32	36	35,5	32,2	31,7
<i>Picea abies</i>	56	33,2	32,9	31	32	31,5	32	32,3	30,5	29,6	29,8
<i>Picea abies</i>	57	34,8	34,6	33	33	33,5	33	30,8	35,4	33,1	32,8

Tabella 5.1.1: Diametri (cm) e altezze (m) misurati su abete rosso fuori bosco.

Abeti fuori bosco											
Tempi (s)											
Specie	Vertex 1	Vertex 2	Trup 1	Trup2	Suunto 1	Suunto 2	MOT11	MOT12	Trees 1	Trees 2	
<i>Picea abies</i>	90	40	61	52	71	62	52	26	44	42	
<i>Picea abies</i>	60	40	35	32	45	40	72	39	41	53	
<i>Picea abies</i>	54	24	25	23	28	31	64	28	26	29	
<i>Picea abies</i>	77	23	23	24	30	50	65	28	32	35	
<i>Picea abies</i>	55	35	26	27	24	60	58	31	26	30	
<i>Picea abies</i>	58	33	19	24	30	33	63	28	23	26	
<i>Picea abies</i>	51	34	18	22	35	38	54	33	41	45	
<i>Picea abies</i>	47	25	22	26	26	28	67	32	28	35	
<i>Picea abies</i>	44	24	20	22	28	32	58	29	26	24	
<i>Picea abies</i>	78	19	24	22	30	29	62	26	28	23	
<i>Picea abies</i>	59	30	31	24	23	24	61	29	23	19	
<i>Picea abies</i>	54	23	18	20	27	38	68	37	25	48	
<i>Picea abies</i>	60	25	24	22	22	21	58	34	26	47	
<i>Picea abies</i>	81	20	32	22	25	34	62	32	23	27	
<i>Picea abies</i>	64	27	23	25	24	32	57	32	25	25	
<i>Picea abies</i>	72	25	22	21	27	27	64	29	29	28	
<i>Picea abies</i>	57	25	29	24	24	44	61	34	23	28	
<i>Picea abies</i>	63	28	23	23	38	32	65	35	29	32	
<i>Picea abies</i>	59	25	25	24	29	27	63	33	32	28	
<i>Picea abies</i>	67	27	24	28	32	30	64	37	31	27	
<i>Picea abies</i>	58	24	24	25	37	31	58	34	31	29	
<i>Picea abies</i>	71	32	30	24	35	33	67	32	33	31	
<i>Picea abies</i>	64	24	28	22	29	30	59	28	28	32	
<i>Picea abies</i>	62	27	24	23	32	29	63	32	26	29	
<i>Picea abies</i>	81	25	25	25	33	31	68	34	31	30	

Tabella 5.1.2: Tempi (s) necessari alle misurazioni su abete rosso fuori bosco.

Abeti dentro bosco											
Altezze (m)											
Specie	Diam (cm)	Vertex 1	Vertex 2	Trup 1	Trup2	Suunto 1	Suunto 2	MOT11	MOT12	Trees 1	Trees 2
<i>Picea abies</i>	43	20,7	21	19	20	20	20	22	21,4	20,9	20,7
<i>Picea abies</i>	32	25,5	25,3	24	24	23	24	23,4	23,6	23,5	23,1
<i>Picea abies</i>	34	23,9	23,9	22	23	23	22	24	26	22,4	22,5
<i>Picea abies</i>	35	25,3	25,9	24	24	23	24	20,9	25	24	23,7
<i>Picea abies</i>	33	23,9	24,1	23	23	22	23	28,3	22,5	22,3	22,4
<i>Picea abies</i>	59	29,9	30	28	28	28	28	36,1	28,5	28,3	28,2
<i>Picea abies</i>	47	27,7	27,9	27	27	28	27	29,6	24,5	27,3	26,7
<i>Picea abies</i>	54	29,3	29,4	28	29	28,5	28,5	29	32,8	28,8	28,3
<i>Picea abies</i>	35	26,7	26,8	26	25	26,5	26,5	27,6	27,9	25,4	25,8
<i>Picea abies</i>	46	29,4	29,2	28	28	29	29	37,3	25,5	28,9	29,1
<i>Picea abies</i>	39	28,5	28,6	27	28	28,5	28	30	26,2	27,2	26,8
<i>Picea abies</i>	38	27,3	27,5	26	27	26,5	26,5	26,7	27,2	26,6	26,9
<i>Picea abies</i>	45	30,3	29,9	28	29	29	29	35,4	25,7	28,7	29,1
<i>Picea abies</i>	30	26,5	27	25	26	25,5	25,5	28,3	28,4	25,8	25,6
<i>Picea abies</i>	39	25,4	25,8	25	25	24	25	25,2	27,6	24,2	24,4
<i>Picea abies</i>	54	27,2	26,7	26	26	26	26,5	31,1	23,1	25	25,6
<i>Picea abies</i>	25	22,6	22,8	21	21	22	22	20,6	20,4	22	21,8
<i>Picea abies</i>	29	24,8	24,9	24	23	23	24	25,5	25,2	23,3	23
<i>Picea abies</i>	27	24,6	24,6	23	23	23	23,5	21,7	23,8	23,6	23,5
<i>Picea abies</i>	34	26,9	26,8	26	26	26	26	24,4	25,3	25,9	25,6
<i>Picea abies</i>	35	29,5	28,2	26	27	27	27	27,7	23,3	27,4	27,5
<i>Picea abies</i>	47	26,7	27,2	26	26	26,5	27	25	28,5	27,1	26,5
<i>Picea abies</i>	28	23,3	22,8	22	22	22,5	22,5	24,8	21,5	21,8	21,7
<i>Picea abies</i>	40	26,9	27,1	27	27	27,5	27	28,2	26,2	26,8	27,2
<i>Picea abies</i>	37	25,2	25,3	25	24	25	25	25,9	20,3	25,1	24,5

Tabella 5.1.3: Diametri (cm) e altezze (m) misurati su abete rosso dentro bosco.

Abeti dentro bosco											
Tempi (s)											
Specie	Vertex 1	Vertex 2	Trup 1	Trup2	Suunto 1	Suunto 2	MOT11	MOT12	Trees 1	Trees 2	
<i>Picea abies</i>	49	23	17	18	30	27	62	32	26	25	
<i>Picea abies</i>	81	23	17	18	22	24	56	25	25	23	
<i>Picea abies</i>	53	27	23	21	28	31	54	31	29	32	
<i>Picea abies</i>	62	25	19	16	27	26	59	19	34	27	
<i>Picea abies</i>	54	24	25	23	28	31	64	28	26	29	
<i>Picea abies</i>	48	29	18	21	25	22	57	21	31	28	
<i>Picea abies</i>	61	22	26	23	21	26	53	19	32	26	
<i>Picea abies</i>	52	28	19	24	29	34	65	33	27	29	
<i>Picea abies</i>	56	25	26	24	24	31	58	23	33	26	
<i>Picea abies</i>	48	23	24	26	27	34	57	35	28	29	
<i>Picea abies</i>	72	28	27	25	25	31	67	26	24	27	
<i>Picea abies</i>	53	24	19	21	24	29	53	28	29	26	
<i>Picea abies</i>	68	29	18	17	28	31	59	34	25	27	
<i>Picea abies</i>	51	27	24	23	27	28	63	27	29	24	
<i>Picea abies</i>	54	26	21	23	25	32	61	26	25	28	
<i>Picea abies</i>	48	24	19	22	25	35	55	21	23	29	
<i>Picea abies</i>	73	25	24	23	23	28	48	32	32	27	
<i>Picea abies</i>	57	25	25	27	26	37	49	23	29	26	
<i>Picea abies</i>	52	25	23	21	24	33	64	27	25	31	
<i>Picea abies</i>	59	27	21	24	19	26	56	33	26	28	
<i>Picea abies</i>	19	22	21	16	18	21	16	24	23	21	
<i>Picea abies</i>	19	17	18	13	16	17	12	13	17	27	
<i>Picea abies</i>	12	12	26	19	29	19	16	13	35	21	
<i>Picea abies</i>	14	14	13	14	12	19	18	12	24	19	
<i>Picea abies</i>	15	16	15	15	20	21	16	14	16	25	

Tabella 5.1.4: Tempi (s) necessari alle misurazioni su abete rosso dentro bosco.

Faggi fuori bosco												
Specie	Diam (cm)	Altezze (m)										
		Vertex 1	Vertex 2	Trup 1	Trup2	Suunto 1	Suunto 2	MOT1	MOT2	Trees 1	Trees 2	
<i>Picea abies</i>	70	19,4	18,8	18	18	17,5	17,5	21,8	25	19,3	18,9	
<i>Picea abies</i>	49	28,5	27,8	27	27	27,5	28	30	29	28,3	27,2	
<i>Picea abies</i>	51	26,9	26,6	26	25	24,5	25	35,7	21,3	24,8	24	
<i>Picea abies</i>	51	19,2	19,3	19	18	18	18	20	22,9	18,3	19,2	
<i>Picea abies</i>	30	18,2	18,6	18	18	17,5	17,5	19,3	17,5	18,2	16,8	
<i>Picea abies</i>	40	17,1	17,1	16,4	16	16	15,5	17	17	16,6	16,1	
<i>Picea abies</i>	43	15,8	16	15	16	15	15	16,8	15,1	15,3	15,3	
<i>Picea abies</i>	45	19,8	19	18	18	18	18,5	20,7	17,6	17,9	18,1	
<i>Picea abies</i>	37	20,8	20,8	20	19	20	20	23,2	24,4	20,3	19,8	
<i>Picea abies</i>	44	20,5	20,4	19	18	19	19	20,8	18,2	19,2	18,8	
<i>Picea abies</i>	39	26,7	26,5	25	25	25,5	25,5	24,2	27,6	25,4	24,8	
<i>Picea abies</i>	40	14,7	15,1	14	14	14	14	15,8	15,1	13,8	13,7	
<i>Picea abies</i>	49	21,4	21,7	21	20	22	22	24,2	18,9	21,8	22,2	
<i>Picea abies</i>	48	18,8	18,8	18	17	18	18	21,8	17,7	17,9	17,5	
<i>Picea abies</i>	61	22,2	22,8	21	21	21,5	21,5	24,9	25	21,2	21	
<i>Picea abies</i>	73	21,9	22,1	21	20	21	21,5	21,8	23,8	21,4	21	
<i>Picea abies</i>	41	21,5	21,3	20	20	20,5	20	19,4	20,3	20	19,8	
<i>Picea abies</i>	38	21,8	21,7	19	20	21,5	21	22,5	21,9	21,3	20,9	
<i>Picea abies</i>	45	19,6	19,1	18	19	18	18,5	18,9	19,3	19,1	18,5	
<i>Picea abies</i>	50	28,7	28,2	28	27	28	28	28,7	28,4	27,6	27,9	
<i>Picea abies</i>	39	27,2	26,9	26	26	26	25,5	26,6	27,3	26,1	25,9	
<i>Picea abies</i>	38	19,4	19,6	18	19	19	19	20,3	19,2	18,6	18,9	
<i>Picea abies</i>	31	14,8	15,3	14	15	14,5	14	14,9	15,4	14,7	14,3	
<i>Picea abies</i>	48	21,7	21,8	21	20	21	21	22,1	21,3	20,8	20,9	
<i>Picea abies</i>	44	19,7	19,8	19	19	19	19	19,3	19,7	18,7	18,9	

Tabella 5.1.5: Diametri (cm) e altezze (m) misurati su faggi fuori bosco.

Faggi fuori bosco											
Specie	Tempi (s)										
	Vertex 1	Vertex 2	Trup 1	Trup2	Suunto 1	Suunto 2	MOT1	MOT2	Trees 1	Trees 2	
<i>Picea abies</i>	13	15	13	15	29	18	11	13	18	24	
<i>Picea abies</i>	9	17	13	16	26	27	13	13	21	19	
<i>Picea abies</i>	15	14	14	16	22	34	14	13	16	18	
<i>Picea abies</i>	16	15	12	17	12	21	18	13	18	19	
<i>Picea abies</i>	16	14	15	14	23	30	11	12	21	19	
<i>Picea abies</i>	15	15	12	13	27	24	15	14	19	18	
<i>Picea abies</i>	52	13	14	16	26	24	16	17	24	32	
<i>Picea abies</i>	48	12	14	15	22	26	21	18	23	18	
<i>Picea abies</i>	51	17	15	16	29	27	20	17	19	27	
<i>Picea abies</i>	47	14	15	19	28	26	14	14	26	20	
<i>Picea abies</i>	61	23	12	13	19	27	21	21	25	19	
<i>Picea abies</i>	51	13	15	14	26	31	14	13	16	27	
<i>Picea abies</i>	45	15	20	16	24	29	19	17	19	28	
<i>Picea abies</i>	47	16	15	15	19	19	16	15	18	23	
<i>Picea abies</i>	60	17	21	18	25	19	22	13	27	21	
<i>Picea abies</i>	58	14	20	14	31	23	15	18	19	29	
<i>Picea abies</i>	52	16	13	12	23	24	17	17	26	18	
<i>Picea abies</i>	57	12	20	15	20	27	15	16	20	25	
<i>Picea abies</i>	48	18	21	13	22	21	11	16	23	24	
<i>Picea abies</i>	46	15	15	18	19	28	18	15	26	24	
<i>Picea abies</i>	59	16	18	15	23	30	19	13	29	19	
<i>Picea abies</i>	56	17	13	18	19	24	21	14	24	27	
<i>Picea abies</i>	50	16	15	16	20	21	18	17	26	18	
<i>Picea abies</i>	54	13	19	17	28	27	19	18	21	24	
<i>Picea abies</i>	55	14	12	17	25	25	11	12	24	16	

Tabella 5.1.6 Tempi (s) necessari alle misurazioni su faggio fuori bosco.

Faggi dentro bosco											
Specie	Diam (cm)	Altezze (m)									
		Vertex 1	Vertex 2	Trup 1	Trup2	Suunto 1	Suunto 2	MOTI 1	MOTI 2	Trees 1	Trees 2
<i>Picea abies</i>	46	33,4	33,2	32	31	31	30,5	36,5	37,8	30	30,2
<i>Picea abies</i>	42	26,1	25,8	25	25	25	25,5	26,2	28,3	25,9	26,3
<i>Picea abies</i>	40	26,8	27,1	25	26	26	26	24,5	28,5	25,9	26,3
<i>Picea abies</i>	23	22,7	22,1	22	21	21	21	25,8	23,8	20,2	20,6
<i>Picea abies</i>	21	21,8	21,8	20	21	21,5	21,5	18,4	22,8	21,1	20,9
<i>Picea abies</i>	20	25,2	25,6	25	24	25	25	25,9	25,6	23,6	24,2
<i>Picea abies</i>	25	21,6	21,8	21	21	22	21,5	23,2	27,1	21,8	21,7
<i>Picea abies</i>	28	23,6	23,4	21	22	21,5	22	19,8	23,5	20,7	20,5
<i>Picea abies</i>	37	26,2	26	24	25	26	25,5	28,5	21,7	24,6	27,4
<i>Picea abies</i>	23	27	26,7	26,4	29	27	27	33,4	30,9	26,5	26,6
<i>Picea abies</i>	19	21,3	21,3	20	20	21	20,5	22,1	17,6	19,9	19,2
<i>Picea abies</i>	27	16,8	16,7	16	17	16	16	18,5	16,6	15,8	16,2
<i>Picea abies</i>	33	21,8	22,1	20	21	21	21	19,5	18,3	20,4	20,5
<i>Picea abies</i>	22	21,9	22,1	21,3	22	21,5	21,5	28,9	22,8	20,3	21
<i>Picea abies</i>	30	21,9	22	21	21	21,5	21	21,9	27,4	20,7	21,2
<i>Picea abies</i>	28	23	22,9	22	23	22,5	22	22	24,6	22	22,4
<i>Picea abies</i>	27	21,2	21,2	20	20	21,5	21,5	17,1	20,4	20,4	20,5
<i>Picea abies</i>	30	25,1	25,2	23	25	25	25	25,2	24,8	24	23,8
<i>Picea abies</i>	21	19,2	19	19	19	20	19,5	19,4	21,3	19,2	19,3
<i>Picea abies</i>	23	21	20,7	20	20	21	21	19,1	21,9	20,2	20,2
<i>Picea abies</i>	25	20,7	20,6	20	21	20,5	20,5	19,5	18,4	20,5	19,8
<i>Picea abies</i>	37	22,7	22,9	21	22	21,5	21	21,3	24,3	21,7	21,4
<i>Picea abies</i>	28	23,1	22,9	20,5	22	21	21,5	19,3	23	21,2	20,9
<i>Picea abies</i>	25	21,7	21,9	21	21	21	21,5	22,6	28,7	21,5	21,8
<i>Picea abies</i>	20	16,5	16,6	16	16	16	16	16,3	17,9	16,1	16,2

Tabella 5.1.7: Diametri (cm) e altezze (m) misurati su faggio dentro bosco.

Faggi dentro bosco											
Specie	Tempi (s)										
	Vertex 1	Vertex 2	Trup 1	Trup2	Suunto 1	Suunto 2	MOTI 1	MOTI2	Trees 1	Trees 2	
<i>Picea abies</i>	50	16	21	18	27	22	19	17	21	20	
<i>Picea abies</i>	53	18	19	14	21	17	16	18	20	21	
<i>Picea abies</i>	49	15	14	16	21	31	13	15	21	20	
<i>Picea abies</i>	53	13	16	15	19	18	18	21	21	22	
<i>Picea abies</i>	48	14	18	23	30	23	19	18	22	27	
<i>Picea abies</i>	47	19	15	17	15	19	23	12	24	21	
<i>Picea abies</i>	54	15	21	19	16	28	16	21	22	24	
<i>Picea abies</i>	52	12	17	13	17	25	23	19	25	20	
<i>Picea abies</i>	46	16	19	15	32	26	19	22	21	21	
<i>Picea abies</i>	55	15	18	14	25	20	16	15	24	22	
<i>Picea abies</i>	51	17	21	18	17	19	15	14	23	19	
<i>Picea abies</i>	54	14	15	21	29	20	20	16	22	23	
<i>Picea abies</i>	48	18	14	13	28	28	19	20	25	20	
<i>Picea abies</i>	53	16	16	17	17	19	23	16	22	25	
<i>Picea abies</i>	49	14	15	15	19	18	19	22	17	19	
<i>Picea abies</i>	48	16	12	18	23	25	12	17	21	22	
<i>Picea abies</i>	51	18	16	12	30	30	17	18	27	21	
<i>Picea abies</i>	53	14	18	15	30	19	16	17	18	25	
<i>Picea abies</i>	48	13	17	15	28	31	18	15	23	18	
<i>Picea abies</i>	51	15	21	16	25	23	14	21	27	21	
<i>Picea abies</i>	62	21	17	18	31	31	19	16	20	20	
<i>Picea abies</i>	48	16	13	15	26	16	17	19	18	22	
<i>Picea abies</i>	52	14	15	14	24	27	12	12	22	26	
<i>Picea abies</i>	49	18	18	19	17	24	12	16	20	23	
<i>Picea abies</i>	53	15	14	17	28	26	14	17	22	21	

Tabella 5.1.8: Tempi (s) necessari alle misurazioni su faggi dentro bosco.

5.2 Errori intrastrumento normali (replicabilità delle misure)

Attraverso gli istogrammi rappresentanti gli errori normali intrastrumento (Grafico 5.2) è possibile notare come in tutti i campioni, ad esclusione degli abeti fuori bosco, lo strumento con l'errore maggiore sia MOTI mentre gli altri strumenti tendono ad avere un errore più ridotto e tra loro comparabile.

La media dell'errore più alta corrisponde a 1,93 m ed è stata registrata con MOTI nel caso di abeti in bosco. Allo stesso campione appartiene la deviazione standard maggiore: 4,28 m. L'errore normale medio inferiore è di 0,00 m e corrisponde all'ipsometro Suunto nel campione dei faggi fuori bosco. La deviazione standard inferiore è invece di 0,24 m ed è stata riscontrata nel campione dei faggi dentro bosco misurati con Vertex.

Anche la deviazione standard segue lo stesso andamento, ovvero MOTI presenta quella maggiore in ognuno dei campioni, seguita da TruPulse, Vertex, Trees e Suunto che presenta quella minore.

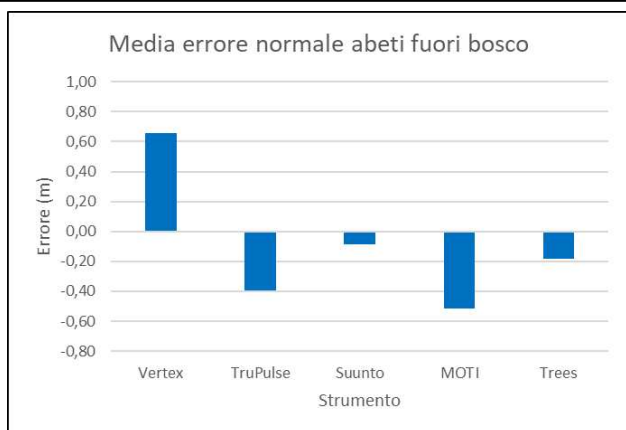


Grafico 5.2a: Media (m) degli errori normali intrastrumento su abeti rossi fuori bosco.

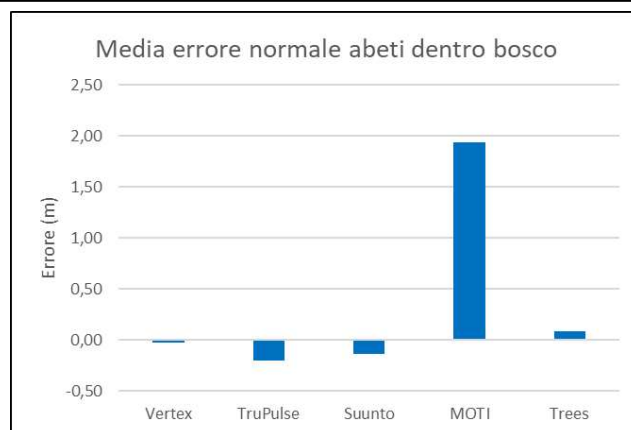


Grafico 5.2b: Media (m) degli errori normali intrastrumento su abeti rossi dentro bosco.

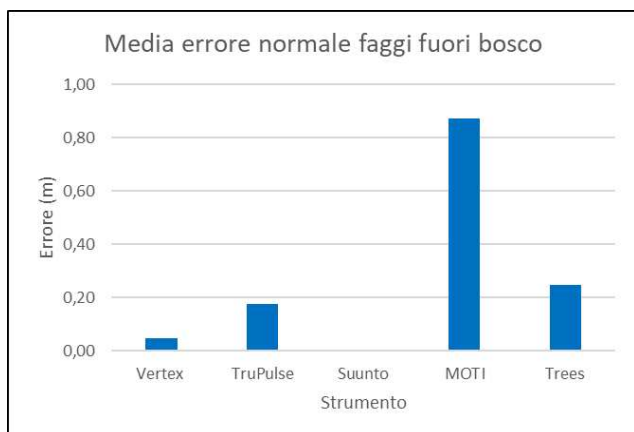


Grafico 5.2c: Media (m) degli errori normali intrastrumento su faggi fuori bosco.

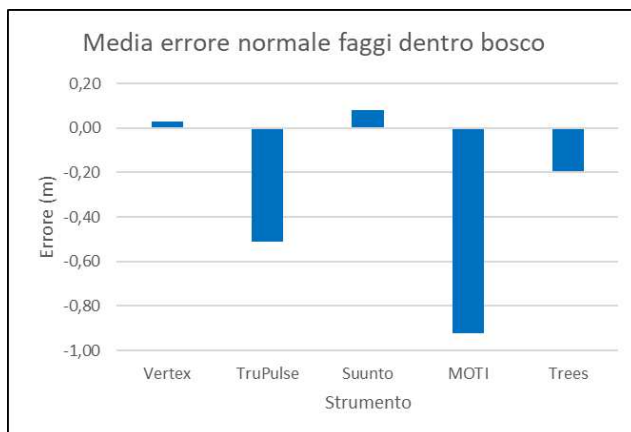


Grafico 5.2d: Media (m) degli errori normali intrastrumento su faggi dentro bosco.

Errori intrastrumento normali							
		Vertex	TruPulse	Suunto	MOTI	Trees	Media
Abeti fuori bosco	Media	0,66	-0,40	-0,09	-0,52	-0,18	-0,11
	Dev. standard	2,10	1,22	0,61	2,87	0,83	1,53
Abeti dentro bosco	Media	-0,03	-0,20	-0,14	1,93	0,08	0,33
	Dev. Standard	0,40	0,65	0,57	4,38	0,35	1,27
Faggi fuori bosco	Media	0,05	0,18	0,00	0,87	0,25	0,27
	Dev. standard	0,38	0,75	0,32	3,52	0,49	1,09
Faggi dentro bosco	Media	0,03	-0,51	0,08	-0,92	-0,20	-0,30
	Dev. standard	0,24	0,89	0,34	3,48	0,65	1,12
Media	Media	0,18	-0,23	-0,04	0,34	-0,01	
	Dev. standard	0,78	0,88	0,46	3,56	0,58	

Tabella 5.2a: Media (m) e deviazione standard degli errori normali intrastrumento suddivisi per strumento e campione.

Grafico 5.2: Istogrammi rappresentanti gli errori normali intrastrumento per ogni campione e tabella delle medie e deviazioni standard.

La tabella 5.2b riportante il numero di outlier ci permette di notare come MOTI fornisca frequentemente delle misurazioni successive (ossia effettuate sullo stesso albero) notevolmente differenti le une dalle altre. Questo è reso evidente dai 30 outlier su un totale di 100 errori intrastrumento calcolati. Gli altri strumenti tendono invece ad avere una buona replicabilità con un numero ridotto di outlier: 2 per Vertex, 1 per TruPulse e 0 sia per Suunto che per Trees.

Outlier errori intrastrumento normali						
		Vertex	TruPulse	Suunto	MOTI	Trees
Abeti fuori bosco	n° outlier	2	1	0	8	0
Abeti dentro bosco	n° outlier	0	0	0	8	0
Faggi fuori bosco	n° outlier	0	0	0	4	0
Faggi dentro bosco	n° outlier	0	0	0	10	0
Totale		2	1	0	30	0

Tabella 5.2b: Numero di outlier tra gli errori intrastrumento normali suddivisi per strumento e per campione.

5.3 Errori intrastrumento assoluti (replicabilità delle misure)

Gli istogrammi e la tabella che riportano gli errori assoluti intrastrumento (Grafico 5.3) evidenziano una situazione del tutto simile a quella descritta dagli errori normali. Pure in questo caso l'unico strumento a spiccare in negativo è MOTI, con errori medi molto elevati: 2,32 m, 3,52 m, 2,13 m e 3,07 m. Questo significa che in ognuno dei campioni analizzati l'errore assoluto medio più elevato è stato registrato con l'utilizzo di MOTI. Lo strumento che ha invece l'errore inferiore in media tra i quattro campioni è Suunto, nonostante il valore inferiore registrato sia da attribuirsi a Vertex nel caso dei faggi dentro bosco (0,2 m).

In merito alla deviazione il quadro è il medesimo: l'ipsometro Suunto è quello che performa meglio, mentre MOTI è il peggiore. La deviazione standard inferiore corrisponde a Trees nel caso dei faggi dentro bosco (0,13) e la maggiore a MOTI nel campione degli abeti dentro bosco (3,19).

Gli ipsometri con la miglior replicabilità delle misurazioni sono in ordine: Suunto, Trees, Vertex e TruPulse.

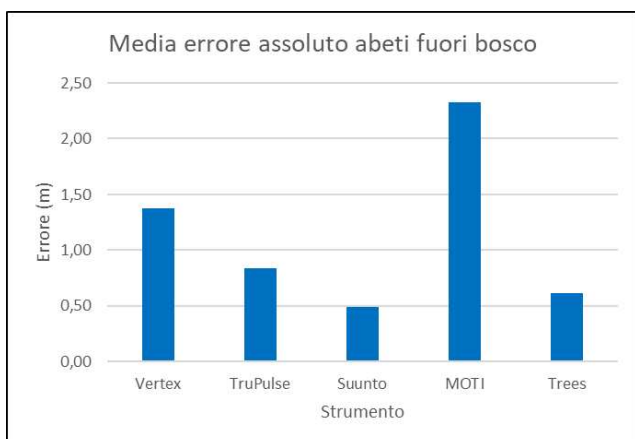


Grafico 5.3a: Media (m) degli errori assoluti intrastrumento su abeti rossi fuori bosco.

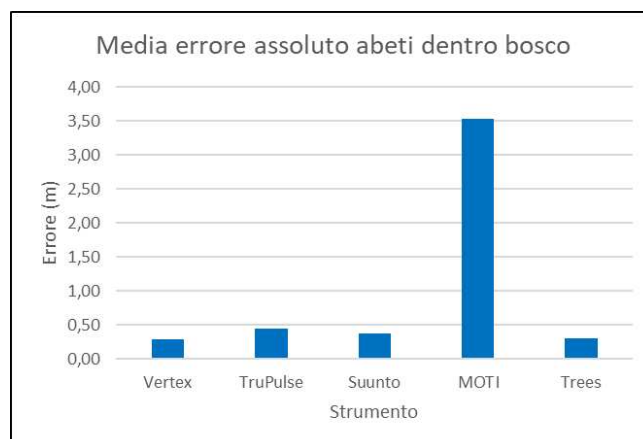


Grafico 5.3b: Media (m) degli errori assoluti intrastrumento su abeti rossi dentro bosco.

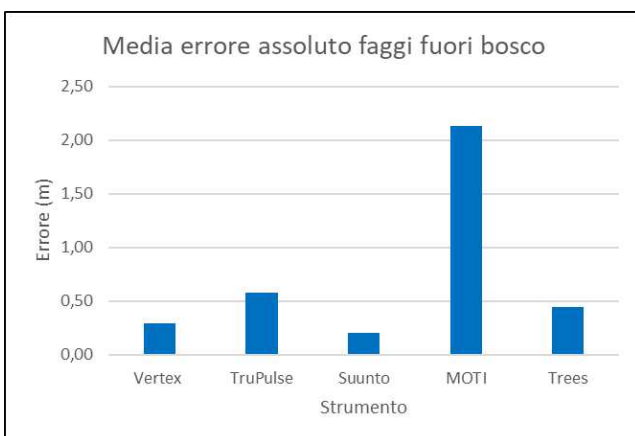


Grafico 5.3c: Media (m) degli errori assoluti intrastrumento su faggi fuori bosco.

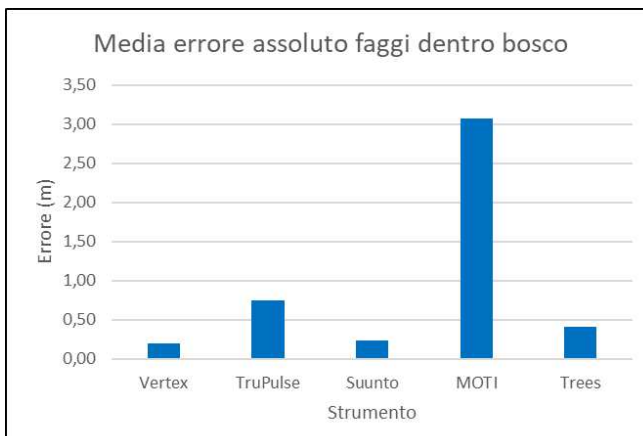


Grafico 5.3d: Media (m) degli errori assoluti intrastrumento su faggi dentro bosco.

Errori intrastrumento assoluti							
		Vertex	TruPulse	Suunto	MOTI	Trees	Media
Abeti fuori bosco	Media	1,38	0,84	0,49	2,32	0,62	1,13
	Dev. standard	1,70	0,97	0,36	1,70	0,57	1,06
Abeti dentro bosco	Media	0,28	0,44	0,38	3,52	0,31	0,99
	Dev. standard	0,27	0,51	0,44	3,19	0,18	0,92
Faggi fuori bosco	Media	0,30	0,58	0,20	2,13	0,44	0,73
	Dev. standard	0,23	0,49	0,25	2,91	0,32	0,84
Faggi dentro bosco	Media	0,20	0,75	0,24	3,07	0,41	0,93
	Dev. standard	0,13	0,69	0,25	1,79	0,54	0,68
Media	Media	0,54	0,65	0,33	2,76	0,44	
	Dev. standard	0,58	0,66	0,33	2,40	0,40	

Tabella 5.3a: Media (m) e deviazione standard degli errori assoluti intrastrumento suddivisi per strumento e campione.

Grafico 5.3: Istogrammi rappresentanti gli errori assoluti intrastrumento per ogni campione e tabella delle medie e deviazioni standard.

La tabella 5.3b riporta il numero di outlier tra gli errori intrastrumento assoluti e, ugualmente al caso degli outlier tra gli errori normali, mette in risalto come MOTI abbia una scarsa replicabilità: in questo caso sono addirittura 39. L'unico strumento per il quale non si sono contati outlier né tra gli errori normali, né tra quelli assoluti, è l'ipsometro Suunto. seguono questo strumento per prestazioni Trees, TruPulse e Vertex con rispettivamente 1, 2 e 4 outlier.

Outlier errori intrastrumento assoluti						
		Vertex	TruPulse	Suunto	MOTI	Trees
Abeti fuori bosco	n° outlier	4	2	0	12	1
Abeti dentro bosco	n° outlier	0	0	0	9	0
Faggi fuori bosco	n° outlier	0	0	0	6	0
Faggi dentro bosco	n° outlier	0	0	0	12	0
Totale		4	2	0	39	1

Tabella 5.3b: Numero di outlier tra gli errori intrastrumento assoluti suddivisi per strumento e per campione.

La tabella 5.3c riporta i risultati ottenuti dai test statistici di Kruskal-Wallis ed i test pos-hoc di Dunn effettuati sugli errori assoluti intrastrumento all'interno dei quattro campioni di piante. In tutti i casi l'ipotesi nulla è stata rigettata e si è quindi passati ad effettuare i test post hoc. I dati evidenziati in giallo sono quelli nei quali il p-value è inferiore a 0,05 e quindi i due campioni confrontati sono statisticamente diversi. È possibile notare come MOTI sia statisticamente diverso da tutti gli altri strumenti in ognuno dei quattro campioni analizzati.

Abeti fuori bosco errori intrastrumento assoluti					
Kruskal-Wallis test for equal medians					
H (chi2):	21,95	Hc (tie corrected):	22,13	p (same):	1,89E-04
Dunn's post hoc tests					
	Vertex	TruPulse	Suunto	MOTI	Trees
Vertex		2,55E-01	3,83E-02	3,33E-02	1,30E-01
TruPulse	2,55E-01		3,51E-01	1,09E-03	7,07E-01
Suunto	3,83E-02	3,51E-01		2,67E-05	5,78E-01
MOTI	3,33E-02	1,09E-03	2,67E-05		2,69E-04
Trees	1,30E-01	7,07E-01	5,78E-01	2,69E-04	

Abeti dentro bosco errori intrastrumento assoluti					
Kruskal-Wallis test for equal medians					
H (chi2):	33,36	Hc (tie corrected):	34,02	p (same):	7,38E-07
Dunn's post hoc tests					
	Vertex	TruPulse	Suunto	MOTI	Trees
Vertex		8,62E-01	7,89E-01	4,59E-06	5,89E-01
TruPulse	8,62E-01		9,25E-01	1,98E-06	4,76E-01
Suunto	7,89E-01	9,25E-01		1,23E-06	4,19E-01
MOTI	4,59E-06	1,98E-06	1,23E-06		5,29E-05
Trees	5,89E-01	4,76E-01	4,19E-01	5,29E-05	

Faggi fuori bosco errore assoluto intrastrumento					
Kruskal-Wallis test for equal medians					
H (chi2):	34,07	Hc (tie corrected):	34,75	p (same):	5,23E-07
Dunn's post hoc tests					
	Vertex	TruPulse	Suunto	MOTI	Trees
Vertex		1,44E-01	2,23E-01	1,27E-05	2,82E-01
TruPulse	1,44E-01		7,35E-03	3,69E-03	6,99E-01
Suunto	2,23E-01	7,35E-03		2,35E-08	2,18E-02
MOTI	1,27E-05	3,69E-03	2,35E-08		1,00E-03
Trees	2,82E-01	6,99E-01	2,18E-02	1,00E-03	

Faggi dentro bosco errore assoluto intrastrumento					
Kruskal-Wallis test for equal medians					
H (chi2):	56,37	Hc (tie corrected):	57,14	p (same):	1,16E-11
Dunn's post hoc tests					
	Vertex	TruPulse	Suunto	MOTI	Trees
Vertex		2,53E-02	9,92E-01	9,71E-11	1,92E-01
TruPulse	2,53E-02		2,47E-02	2,29E-05	3,52E-01
Suunto	9,92E-01	2,47E-02		9,10E-11	1,89E-01
MOTI	9,71E-11	2,29E-05	9,10E-11		2,39E-07
Trees	1,92E-01	3,52E-01	1,89E-01	2,39E-07	

Tabella 5.3c Risultati dei test statistici di Kruskal-Wallis e dei test post-hoc di Dunn sugli errori assoluti intrastrumento.

5.4 Errori interstrumento normali (misura dell'accuratezza)

Tramite gli istogrammi e la tabella che riportano gli errori normali interstrumento (Grafico 5.4) e che descrivono l'accuratezza degli ipsometri, possiamo notare come Suunto sia stato quello che ha performato meglio con una media di errore pari a $-0,25$ m e, nel caso del campione degli abeti fuori bosco, ha fatto registrare l'errore medio più basso, $-0,04$ m. La deviazione standard inferiore è stata invece rilevata con Vertex nel campione dei faggi fuori bosco e corrisponde a $0,39$ m.

Esattamente come nel caso degli errori normali, lo strumento con errore maggiore è MOTI che ha fatto registrare un errore medio tra tutti i campioni di $2,76$ m, in particolare nel campione degli abeti dentro bosco l'errore è stato di $3,52$ m. Allo stesso strumento corrisponde anche la deviazione standard maggiore, ovvero $2,40$ m.

Gli strumenti in ordine di accuratezza sono quindi: Suunto (errore medio $0,33$ m), Trees (errore medio $0,44$ m), Vertex (errore medio $0,54$ m), TruPulse (errore medio $0,65$ m) e MOTI (errore medio $2,76$ m).

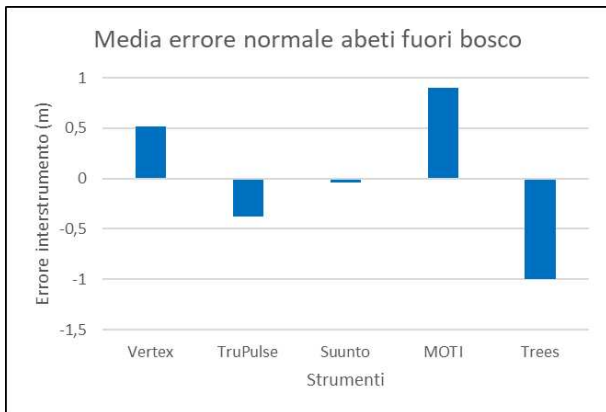


Grafico 5.4a: Media (m) degli errori normali interstrumento su abeti rossi fuori bosco.

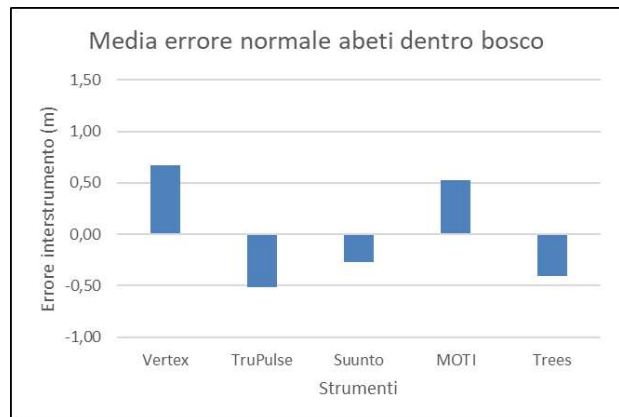


Grafico 5.4b: Media (m) degli errori normali interstrumento su abeti rossi dentro bosco.

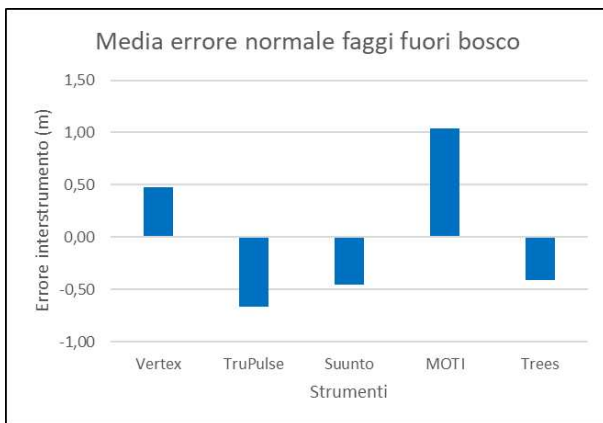


Grafico 5.4c: Media (m) degli errori normali interstrumento su faggi fuori bosco.

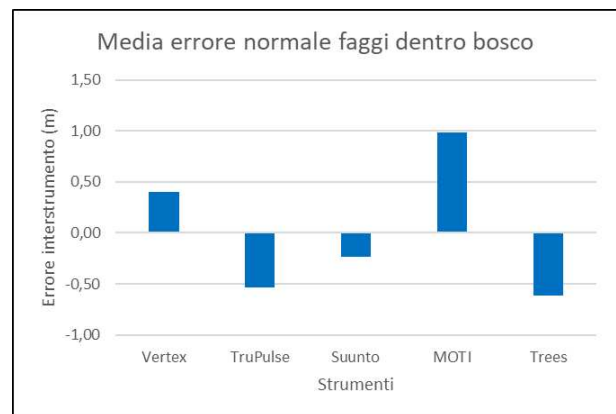


Grafico 5.4d: Media (m) degli errori normali interstrumento su faggi dentro bosco.

Errori interstrumento normali							
		Vertex	TruPulse	Suunto	MOTI	Trees	Media
Abeti fuori bosco	Media	0,52	-0,38	-0,04	0,90	-1,00	0,00
	Dev. standard	1,45	0,92	0,80	1,90	0,82	1,18
Abeti dentro bosco	Media	0,67	-0,52	-0,27	0,52	-0,41	0,00
	Dev. Standard	0,50	0,52	0,54	2,68	0,51	0,95
Faggi fuori bosco	Media	0,48	-0,66	-0,45	1,04	-0,41	0,00
	Dev. standard	0,39	0,58	0,50	2,08	0,47	0,81
Faggi dentro bosco	Media	0,40	-0,53	-0,24	0,98	-0,61	0,00
	Dev. standard	0,67	0,64	0,68	2,50	0,75	1,05
Media	Media	0,52	-0,52	-0,25	0,86	-0,61	
	Dev. standard	0,76	0,67	0,63	2,29	0,64	

Tabella 5.4a: Media (m) e deviazione standard degli errori normali interstrumento suddivisi per strumento e campione.

Grafico 5.4: Istogrammi rappresentanti gli errori normali interstrumento per ogni campione e tabella delle medie e deviazioni standard.

La tabella 5.4b riporta il numero di outlier tra gli errori interstrumento normali e, ugualmente ai casi degli outlier tra gli errori intrastrumento normali e assoluti, ci permette di notare come MOTI fornisca frequentemente misurazioni ampiamente erronee. In questo caso sono stati registrati 45 outlier su un totale di 200 misurazioni. Suunto non fa registrare outlier. TruPulse uno, Trees due e Vertex tre.

		Outlier errori interstrumento normali				
		Vertex	TruPulse	Suunto	MOTI	Trees
Abeti fuori bosco	n° outlier	3	1	0	9	2
Abeti dentro bosco	n° outlier	0	0	0	14	0
Faggi fuori bosco	n° outlier	0	0	0	10	0
Faggi dentro bosco	n° outlier	0	0	0	12	0
Totale		3	1	0	45	2

Tabella 5.4b Numero di outlier tra gli errori interstrumento normali suddivisi per strumento e campione.

All'interno della tabella 5.4c sono riportati gli errori interstrumento normali espressi in percentuale. In modo del tutto identico alla situazione descritta dal grafico 5.4 notiamo come a MOTI corrisponda l'errore percentuale maggiore, pari al 3,47%. L'ipsometro con l'errore inferiore è Suunto con -0,65%.

		Errore interstrumento normale %				
		Vertex	TruPulse	Suunto	MOTI	Trees
Abeti fuori bosco	media	1,66	-1,26	-0,17	2,86	-3,09
Abeti dentro bosco	media	2,70	-2,02	-1,05	1,94	-1,57
Faggi fuori bosco	media	2,39	-3,18	-2,30	5,09	-2,00
Faggi dentro bosco	media	1,85	-2,30	0,92	3,99	-2,62
Media		2,15	-2,19	-0,65	3,47	-2,32

Tabella 5.4c Errore interstrumento normale espresso in percentuale e suddiviso per strumento e campione.

5.5 Errori interstrumento assoluti (misura dell'accuratezza)

All'interno del grafico 5.5 sono riportati gli errori assoluti interstrumento. Tramite gli istogrammi è evidente come l'applicazione MOTI abbia un errore assoluto ampiamente maggiore rispetto agli altri strumenti in tutti e quattro i campioni. La media dell'errore tra tutte le osservazioni è di 1,84 m, mentre il più elevato tra gli altri 4 strumenti ha un valore minore della metà di questo, ovvero di 0,73 m e corrisponde a Vertex. Nel caso di abeti dentro bosco misurati con MOTI è stato osservato l'errore assoluto maggiore, pari a 2,07 m, mentre l'errore minore appartiene al caso degli abeti dentro bosco misurati con Suunto.

Anche la deviazione standard maggiore, come in tutti gli altri casi descritti precedentemente, è stata registrata con MOTI ed è pari a 1,61 m.

Gli strumenti con accuratezza migliore sono quindi in questo caso: Suunto (errore assoluto 0,54 m), TruPulse (errore assoluto 0,67 m), Trees (errore assoluto 0,70m), Vertex (errore assoluto 0,73 m) e MOTI (errore assoluto 1,84 m).

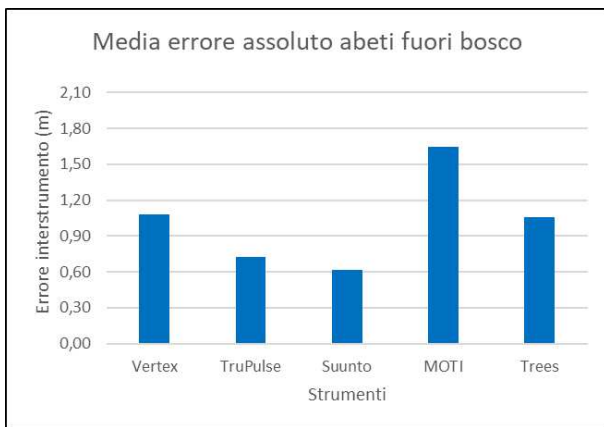


Grafico 5.5a: Media (m) degli errori assoluti interstrumento su abeti rossi fuori bosco.

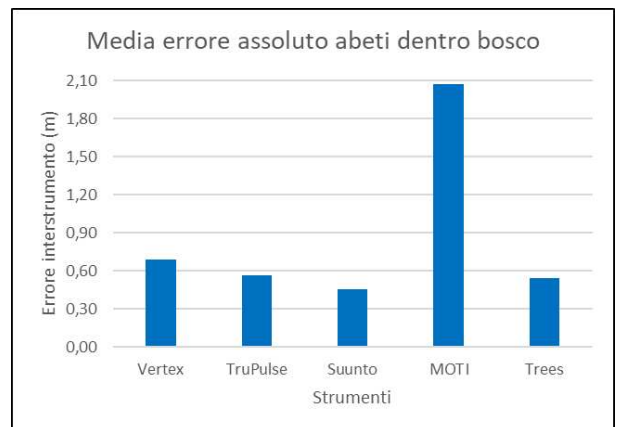


Grafico 5.5b: Media (m) degli errori assoluti interstrumento su abeti rossi dentro bosco.

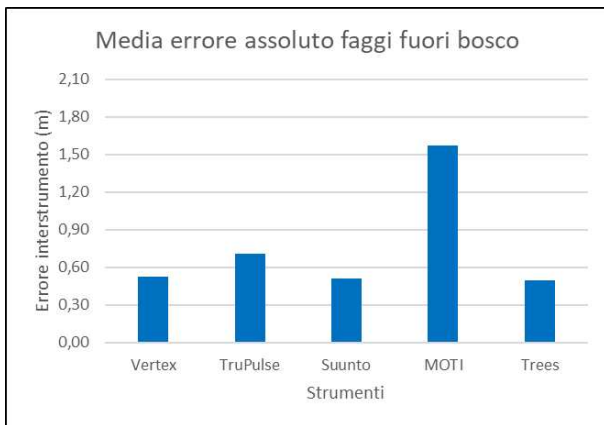


Grafico 5.5c: Media (m) degli errori assoluti interstrumento su faggi fuori bosco.

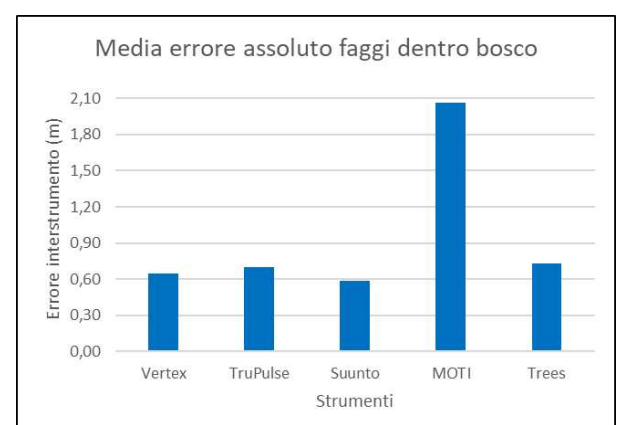


Grafico 5.5a: Media (m) degli errori assoluti interstrumento su faggi dentro bosco.

		Errori interstrumento assoluti					
		Vertex	TruPulse	Suunto	MOTI	Trees	Media
Abeti fuori bosco	Media	1,08	0,72	0,62	1,64	1,05	1,02
	Dev. standard	1,10	0,68	0,50	1,29	0,75	0,86
Abeti dentro bosco	Media	0,69	0,57	0,46	2,07	0,54	0,86
	Dev. standard	0,48	0,47	0,39	1,75	0,36	0,69
Faggi fuori bosco	Media	0,52	0,70	0,51	1,57	0,49	0,76
	Dev. standard	0,33	0,53	0,44	1,71	0,38	0,68
Faggi dentro bosco	Media	0,64	0,70	0,59	2,06	0,73	0,94
	Dev. standard	0,44	0,44	0,42	1,70	0,64	0,73
Media	Media	0,73	0,67	0,54	1,84	0,70	
	Dev. standard	0,59	0,53	0,44	1,61	0,53	

Tabella 5.5a: Media (m) e deviazione standard degli errori assoluti interstrumento suddivisi per strumento e campione.

Grafico 5.5: Istogrammi rappresentanti gli errori assoluti interstrumento per ogni campione e tabella delle medie e deviazioni standard.

La tabella 5.5b riporta il numero di outlier tra gli errori interstrumento assoluti ed anche qui la situazione è analoga a quella descritta dagli errori normali interstrumento, con 71 outlier registrati con MOTI mentre 3 per TruPulse e Suunto e 7 per Vertex e Trees. Su un totale di 200 misurazioni di errore assoluto interstrumento il 35,5% delle misurazioni effettuate con MOTI sono outlier.

Outlier errori interstrumento assoluti						
		Vertex	TruPulse	Suunto	MOTI	Trees
Abeti fuori bosco	n° outlier	6	2	1	18	4
Abeti dentro bosco	n°outlier	1	0	0	18	0
Faggi fuori bosco	n° outlier	0	1	2	16	1
Faggi dentro bosco	n° outlier	0	0	0	19	2
Totale		7	3	3	71	7

Tabella 5.5b Numero di outlier tra gli errori interstrumento assoluti suddivisi per strumento e campione.

All'interno della tabella 5.5c sono riportati gli errori interstrumento assoluti espressi in percentuale. Lo strumento con la percentuale di errore maggiore è MOTI con 7,38%, seguono Vertex (2,91%), TruPulse (2,75%), Trees (2,72%) e Suunto (2,23%). In particolare, nel caso di abeti dentro bosco, MOTI ha fatto registrare un errore interstrumento assoluto percentuale del 7,91%.

Errore interstrumento assoluto %						
		Vertex	TruPulse	Suunto	MOTI	Trees
Abeti fuori bosco	media	3,41	2,29	1,94	5,13	3,27
Abeti dentro bosco	media	2,75	2,20	1,79	7,91	2,12
Faggi fuori bosco	media	2,59	3,44	2,59	7,48	2,39
Faggi dentro bosco	media	2,88	3,07	2,58	8,99	3,09
Media		2,91	2,75	2,23	7,38	2,72

Tabella 5.5c Errore interstrumento assoluto percentuale suddiviso per strumento e campione.

All'interno della tabella 5.5d sono riportati i risultati ottenuti dai test statistici di Kruskal-Wallis ed i test pos-hoc di Dunn effettuati sugli errori assoluti interstrumento all'interno dei quattro campioni di piante. In tutti i casi l'ipotesi nulla è stata rigettata e si è quindi passati ad effettuare i test post hoc. I dati evidenziati in giallo sono quelli nei quali il p-value è inferiore a 0,05 e quindi i due campioni confrontati sono statisticamente diversi. Come nel caso degli errori assoluti intrastrumento, l'unica popolazione statistica ad essere differente da tutte le altre in ognuno dei quattro campioni è quella degli errori assoluti calcolati su MOTI. Solamente in casi sporadici gli errori degli altri strumenti sono risultati statisticamente diversi da altre popolazioni di errori.

Abeti fuori bosco errori interstrumento assoluti					
Kruskal-Wallis test for equal medians					
H (chi2):	31,62	Hc (tie corrected):	31,62	p (same):	2,29E-06
Dunn's post hoc tests					
	Vertex	TruPulse	Suunto	MOTI	Trees
Vertex		0,07112	0,0202	0,008973	0,4936
TruPulse	0,07112		0,6045	9,97E-06	0,0128
Suunto	0,0202	0,6045		7,99E-07	0,002637
MOTI	0,008973	9,97E-06	7,99E-07		0,05379
Trees	0,4936	0,0128	0,002637	0,05379	

Faggi fuori bosco errore assoluto interstrumento					
Kruskal-Wallis test for equal medians					
H (chi2):	30,29	Hc (tie corrected):	30,29	p (same):	4,26E-06
Dunn's post hoc tests					
	Vertex	TruPulse	Suunto	MOTI	Trees
Vertex		2,40E-01	4,70E-01	8,53E-05	4,78E-01
TruPulse	2,40E-01		5,78E-02	5,88E-03	5,95E-02
Suunto	4,70E-01	5,78E-02		3,29E-06	9,90E-01
MOTI	8,53E-05	5,88E-03	3,29E-06		3,51E-06
Trees	4,78E-01	5,95E-02	9,90E-01	3,51E-06	

Abeti dentro bosco errori interstrumento assoluti					
Kruskal-Wallis test for equal medians					
H (chi2):	61,28	Hc (tie corrected):	61,29	p (same):	1,56E-12
Dunn's post hoc tests					
	Vertex	TruPulse	Suunto	MOTI	Trees
Vertex		1,65E-01	1,40E-02	4,23E-06	2,11E-01
TruPulse	1,65E-01		2,85E-01	2,13E-09	8,92E-01
Suunto	1,40E-02	2,85E-01		1,70E-12	2,28E-01
MOTI	4,23E-06	2,13E-09	1,70E-12		4,85E-09
Trees	2,11E-01	8,92E-01	2,28E-01	4,85E-09	

Faggi dentro bosco errore assoluto interstrumento					
Kruskal-Wallis test for equal medians					
H (chi2):	38,07	Hc (tie corrected):	38,08	p (same):	1,08E-07
Dunn's post hoc tests					
	Vertex	TruPulse	Suunto	MOTI	Trees
Vertex		5,93E-01	6,00E-01	1,57E-06	9,81E-01
TruPulse	5,93E-01		2,89E-01	1,98E-05	5,76E-01
Suunto	6,00E-01	2,89E-01		9,97E-08	6,17E-01
MOTI	1,57E-06	1,98E-05	9,97E-08		1,39E-06
Trees	9,81E-01	5,76E-01	6,17E-01	1,39E-06	

Tabella 5.5d Risultati dei test statistici di Kruskal-Wallis e dei test post-hoc di Dunn sugli errori assoluti interstrumento.

5.6 Tempi necessari alle misurazioni (efficienza degli strumenti)

Nei grafici e nella tabella 5.6 sono riportati i dati relativi alle medie dei tempi necessari alle misurazioni delle altezze tramite ognuno degli strumenti. I dati sono disposti nell'ordine cronologico in cui si sono svolti i rilievi: il campione abeti fuori bosco è stato il primo esaminato mentre il campione faggi dentro bosco è stato l'ultimo. In questo senso è da notare come i tempi vadano a diminuire di campione in campione. Le due misurazioni sono state mantenute separate: ed è stata inoltre rappresentata la deviazione standard tramite le bande di errore. Attraverso gli istogrammi è facile notare come la prima misurazione effettuata con Vertex e MOTI richieda notevolmente più tempo rispetto alla seconda (ad esclusione dei campioni dei faggi fuori e dentro bosco nei quali non è stato registrato il tempo necessario al posizionamento della palina per MOTI) e a tutti gli altri strumenti. Questo è legato alle operazioni di posizionamento di transponder e palina alla base della pianta.

TruPulse è lo strumento che in ogni campione ha richiesto meno tempo per realizzare le misurazioni. Nel caso dei faggi fuori bosco ha fatto registrare il tempo medio minimo di 15,44 secondi. Seguono come efficienza Trees che ha come tempo medio minimo 21,72 secondi nel caso dei faggi dentro bosco e Suunto con tempo medio minimo di 23,40 secondi nello stesso campione. I due strumenti meno efficienti sono invece MOTI e Vertex. MOTI richiede tempi esigui per l'effettiva misurazione, come visibile nelle tabelle dei due campioni di faggi dove i tempi medi vanno da 15,16 a 17,75 secondi, ma è fortemente penalizzata dal tempo richiesto dal posizionamento della palina.

La deviazione standard nella prima misurazione effettuata con Vertex su abeti dentro e fuori bosco è particolarmente elevata in quanto le condizioni del sottobosco variano notevolmente da una pianta all'altra andando ad aumentare o diminuire sensibilmente il tempo di cui necessita l'operatore per

portare il transponder fino alla pianta e per tornare in un punto dal quale utilizzare l'ipsometro in modo ottimale.

La tabella 5.6 nell'ultima colonna di dati riporta la media dei tempi e delle deviazioni standard per ognuno degli ipsometri considerati. Nella computazione del primo tempo per MOTI non sono stati inseriti i dati relativi alle prime rilevazioni in faggeta in quanto, diversamente dalle altre, era presente un secondo operatore che posizionava la palina riducendo notevolmente i tempi di misurazione.

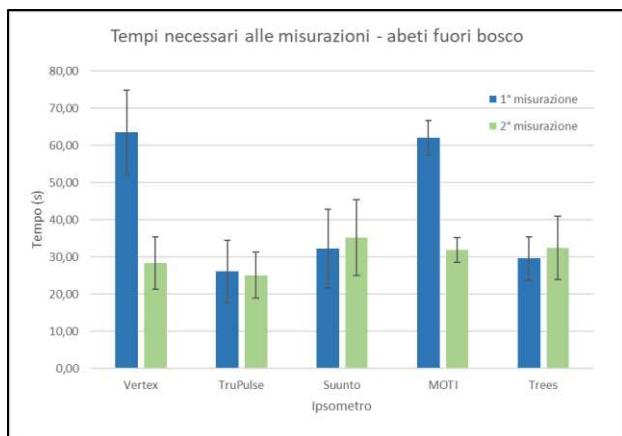


Grafico 5.6a Tempi necessari alle misurazioni su abeti fuori bosco.

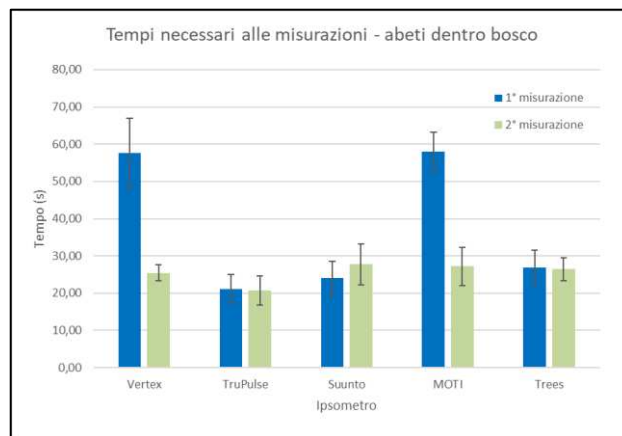


Grafico 5.6b Tempi necessari alle misurazioni su abeti dentro bosco.

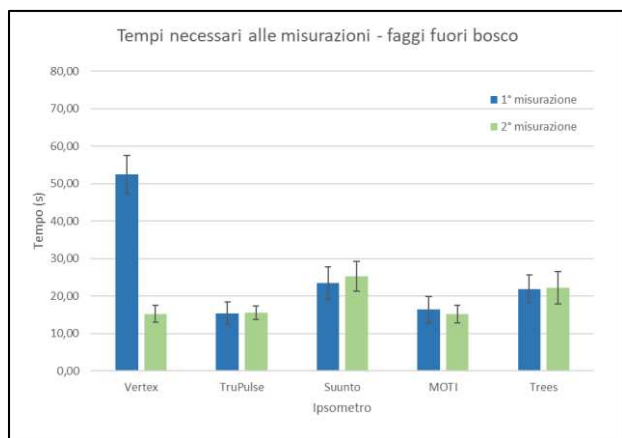


Grafico 5.6c Tempi necessari alle misurazioni su faggi fuori bosco.

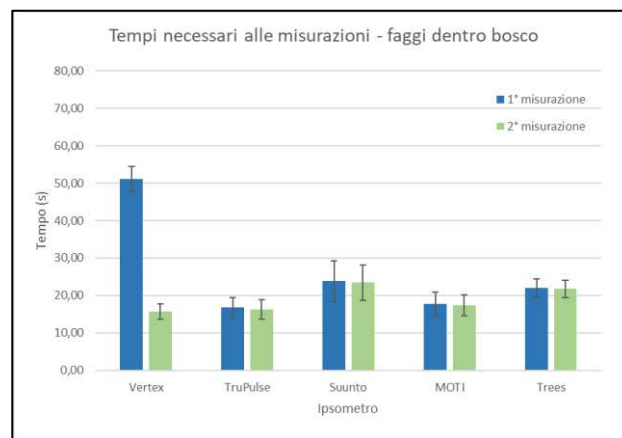


Grafico 5.6d Tempi necessari alle misurazioni su faggi dentro bosco.

Dati di tempi necessari alle misurazioni		Tempi abeti fuori bosco		Tempi abeti dentro bosco		Tempi faggi fuori bosco		Tempi faggi dentro bosco		Media	
		Media	Dev. standard	Media	Dev. standard	Media	Dev. standard	Media	Dev. standard	Media	Dev. Standard
Vertex	1° tempo	63,44	11,33	57,55	9,35	52,47	5,02	51,08	3,39	56,14	7,27
	2° tempo	28,40	7,07	25,45	2,09	15,24	2,30	15,68	2,12	21,19	3,39
TruPulse	1° tempo	26,12	8,41	21,12	3,83	15,44	3,04	16,80	2,60	19,87	4,47
	2° tempo	25,12	6,13	20,68	3,87	15,52	1,81	16,28	2,59	19,40	3,60
Suunto	1° tempo	32,24	10,50	24,08	4,42	23,48	4,27	23,80	5,47	25,90	6,16
	2° tempo	35,24	10,22	27,72	5,53	25,28	4,03	23,40	4,78	27,91	6,14
MOTI	1° tempo	62,04	4,63	58,00	5,23	16,36	3,46	17,75	3,13	60,02	4,93
	2° tempo	31,84	3,37	27,15	5,08	15,16	2,36	17,36	2,81	22,88	3,41
Trees	1° tempo	29,60	5,82	26,92	4,66	21,92	3,67	21,92	2,52	25,09	4,17
	2° tempo	32,44	8,57	26,40	3,06	22,24	4,33	21,72	2,26	25,70	4,56

Tabella 5.6 Dati di tempi necessari alle misurazioni e deviazioni standard divisi per strumento e misurazione con colonna riportante media di tempi e deviazione standard per strumento.

Nella tabella 5.7 sono riportati i risultati dei test statistici di Kruskal-Wallis e dei test post-hoc di Dunn effettuati per verificare se ci fosse una differenza statistica tra i tempi necessari alla misurazione delle altezze per ogni strumento. Per tali elaborazioni non sono stati considerati i dati relativi alle ultime cinque piante appartenenti al campione degli abeti fuori bosco ed alle prime sei piante degli abeti dentro bosco. I riquadri evidenziati in giallo indicano che il corrispettivo test post-hoc ha rivelato che è presente una differenza statisticamente significativa tra i due campioni considerati, ovvero il p-value è inferiore a 0,05. Nelle intestazioni delle colonne si è utilizzato il simbolo V per indicare il Vertex, TP per TruPulse, S per Suunto, M per MOTI e T per Trees seguiti dai numeri 1 o 2 per indicare che fosse la prima o la seconda misurazione.

La maggior parte delle coppie confrontate ha un'efficienza significativamente diversa, ad esclusione del campione degli abeti dentro bosco la seconda misurazione effettuata con Vertex, non è differente da entrambe le misurazioni svolte con TruPulse. Trees e Suunto risultano frequentemente statisticamente simili e lo stesso vale per MOTI e TruPulse nei primi due campioni (abeti fuori e dentro bosco).

Test statistici tempi abeti fuori bosco										
Kruskal-Wallis test for equal medians										
H (chi2):	148,7		Hc (tie corrected):	149		p (same):	1,4E-27			
Dunn's post hoc tests										
	V1	V2	TP1	TP2	S1	S1	M1	M2	T1	T2
Vertex 1		0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,9353	0,0000	0,0000	0,0000
Vertex 2	0,0000		0,1974	0,0646	0,1796	0,0136	0,0000	0,0224	0,4725	0,1201
Trup 1	0,0000	0,1974		0,5762	0,0085	0,0002	0,0000	0,0004	0,0447	0,0045
Trup2	0,0000	0,0646	0,5762		0,0014	0,0000	0,0000	0,0000	0,0103	0,0007
Suunto 1	0,0000	0,1796	0,0085	0,0014		0,2608	0,0000	0,3464	0,5330	0,8318
Suunto 2	0,0000	0,0136	0,0002	0,0000	0,2608		0,0000	0,8548	0,0805	0,3617
MOTI 1	0,9353	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000			0,0000	0,0000	0,0000
MOTI 2	0,0000	0,0224	0,0004	0,0000	0,3464	0,8548	0,0000		0,1176	0,4659
Trees 1	0,0000	0,4725	0,0447	0,0103	0,5330	0,0805	0,0000	0,1176		0,4032
Trees 2	0,0000	0,1201	0,0045	0,0007	0,8318	0,3617	0,0000	0,4659	0,4032	

Test statistici tempi abeti dentro bosco										
Kruskal-Wallis test for equal medians										
H (chi2):	136,2		Hc (tie corrected):	136,7		p (same):	5,05E-25			
Dunn's post hoc tests										
	V1	V2	TP1	TP2	S1	S1	M1	M2	T1	T2
Vertex 1		0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0016	0,8267	0,0000	0,0000	0,0000
Vertex 2	0,0000		0,0363	0,0300	0,9673	0,0122	0,0000	0,3320	0,1128	0,1359
Trup 1	0,0000	0,0363		0,9389	0,0328	0,0000	0,0000	0,0022	0,0002	0,0003
Trup2	0,0000	0,0300	0,9389		0,0270	0,0000	0,0000	0,0017	0,0002	0,0003
Suunto 1	0,0000	0,9673	0,0328	0,0270		0,0137	0,0000	0,3529	0,1224	0,1470
Suunto 2	0,0016	0,0122	0,0000	0,0000	0,0137		0,0008	0,1244	0,3571	0,3100
MOTI 1	0,8267	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0008		0,0000	0,0000
MOTI 2	0,0000	0,3320	0,0022	0,0017	0,3529	0,1244	0,0000		0,5381	0,6022
Trees 1	0,0000	0,1128	0,0002	0,0002	0,1224	0,3571	0,0000	0,5381		0,9248
Trees 2	0,0000	0,1359	0,0003	0,0003	0,1470	0,3100	0,0000	0,6022	0,9248	

Test statistici tempi faggi fuori bosco										
Kruskal-Wallis test for equal medians										
H (chi2):	148,7		Hc (tie corrected):	149		p (same):	1,4E-27			
Dunn's post hoc tests										
	V1	V2	TP1	TP2	S1	S1	M1	M2	T1	T2
Vertex 1		0,0000	0,0000	0,0000	0,0031	0,0214	0,0000	0,0000	0,0010	0,0009
Vertex 2	0,0000		0,5243	0,7914	0,0000	0,0000	0,1498	0,6813	0,0000	0,0000
Trup 1	0,0000	0,5243		0,7097	0,0000	0,0000	0,4216	0,8212	0,0001	0,0001
Trup2	0,0000	0,7914	0,7097		0,0000	0,0000	0,2396	0,8837	0,0000	0,0000
Suunto 1	0,0031	0,0000	0,0000	0,0000		0,5109	0,0007	0,0000	0,7463	0,7263
Suunto 2	0,0214	0,0000	0,0000	0,0000	0,5109		0,0001	0,0000	0,3266	0,3137
MOTI 1	0,0000	0,1498	0,4216	0,2396	0,0007	0,0001		0,3032	0,0022	0,0024
MOTI 2	0,0000	0,6813	0,8212	0,8837	0,0000	0,0000	0,3032		0,0000	0,0000
Trees 1	0,0010	0,0000	0,0001	0,0000	0,7463	0,3266	0,0022	0,0000		0,9788
Trees 2	0,0009	0,0000	0,0001	0,0000	0,7263	0,3137	0,0024	0,0000	0,9788	

Test statistici tempi faggi dentro bosco										
Kruskal-Wallis test for equal medians										
H (chi2):	148,7		Hc (tie corrected):	149		p (same):	1,4E-27			
Dunn's post hoc tests										
	V1	V2	TP1	TP2	S1	S1	M1	M2	T1	T2
Vertex 1		0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0003	0,0004	0,0000	0,0000	0,0001
Vertex 2	0,0000		0,3022	0,5846	0,0000	0,0000	0,1506	0,1165	0,0000	0,0000
Trup 1	0,0000	0,3022		0,6277	0,0000	0,0000	0,6850	0,5906	0,0000	0,0000
Trup2	0,0000	0,5846	0,6277		0,0000	0,0000	0,3731	0,3063	0,0000	0,0000
Suunto 1	0,0003	0,0000	0,0000	0,0000		0,9344	0,0001	0,0002	0,9103	0,8370
Suunto 2	0,0004	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,9344		0,0001	0,0001	0,7733
MOTI 1	0,0000	0,1506	0,6850	0,3731	0,0001	0,0001		0,8948	0,0001	0,0002
MOTI 2	0,0000	0,1165	0,5906	0,3063	0,0002	0,0001	0,8948		0,0002	0,0004
Trees 1	0,0002	0,0000	0,0000	0,0000	0,9103	0,8454	0,0001	0,0002		0,9258
Trees 2	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,8370	0,7733	0,0002	0,0004	0,9258	

Tabella 5.7 Risultati dei test statistici di Kruskal-Wallis e dei test post-hoc di Dunn sui tempi. V (Vertex), TP(TruPulse), S (Suunto), M (MOTI), T (Trees). Le caselle gialle indicano che l'ipotesi nulla H_0 è stata rigettata.

6. DISCUSSIONE

6.1 Replicabilità delle misure (errore intrastrumento)

6.1.1 MOTI (MOBile Timber cruise)

Confrontando l'applicazione per smartphone "MOTI" con gli altri strumenti utilizzati, per quanto riguarda la replicabilità delle misure, notiamo come questa sia notevolmente meno affidabile. In media, considerando tutti e quattro i campioni, per MOTI si osserva un errore intrastrumento assoluto di 2,76 m con una deviazione standard di 2,40 m ed un totale di 39 outlier tra i 100 errori misurati. Ricontriamo quindi che questo strumento fornisce misurazioni notevolmente differenti le une dalle altre sulla stessa pianta. Per determinare l'altezza di una pianta con discreta precisione è quindi necessario effettuare numerose misurazioni e considerare la media di queste come misura corretta. Queste accortezze rendono però l'utilizzo di tale strumento meno agevole ed efficiente rispetto ad altri.

Si può dunque affermare con fondamento che la replicabilità di misurazione fornita dall'applicazione MOTI sia inferiore agli altri strumenti.

6.1.2 Trees

Trees, viceversa, ha fatto registrare un errore intrastrumento assoluto di 0,44 m ed una deviazione standard di 0,40 m. Questi valori sono molto simili a quelli degli altri strumenti, l'unico a fornire una replicabilità migliore è Suunto con 0,33 m e deviazione standard di 0,33 m. Osservando i test statistici alla Tabella 5.3c possiamo verificare come nella maggior parte dei casi l'errore di Trees non sia statisticamente differente da quelli degli altri strumenti, ad esclusione di MOTI, che ha performance ampiamente inferiori. Solo nel campione dei faggi fuori bosco la replicabilità dell'applicazione risulta differente da quella dell'ipsometro Suunto. Per quanto riguarda gli outlier ne è stato registrato solamente uno, anche secondo questo parametro è il secondo strumento migliore dopo Suunto che non ha fatto registrare outlier.

Sulla base di questi dati possiamo quindi affermare che, per quanto concerne la replicabilità delle misure, l'applicazione Trees possa essere considerata al pari e in certi casi persino migliore degli strumenti abitualmente utilizzati dai professionisti.

6.2 Accuratezza degli strumenti (errore interstrumento)

Attraverso il confronto degli errori interstrumento assoluti siamo in grado di valutare l'accuratezza dei vari strumenti. In letteratura non sono presenti articoli scientifici che valutano le performance di applicazioni per smartphone specifiche per il rilievo forestale ma solo di ipsometri tradizionali. Uno di questi è lo studio di Luoma (Luoma et al., 2017) nel quale è stata valutata l'accuratezza dell'ipsometro Haglof Vertex IV. L'errore qui riscontrato è pari al 2,7% su *Pinus sylvestris*, al 2,6% su *Picea abies* e del 3,6% su *Betula alba*. Nel nostro caso è stato riscontrato un errore pari al 2,91% facendo una media tra rilievi su *Picea abies* e *Fagus sylvatica*, per cui un risultato molto simile. Nel nostro caso non sono però state registrate differenze in accuratezza tra conifere e latifoglie. In un altro studio svolto da Antonio Villasante e Cristina Fernandez (Villasante, Fernandez, 2014) dove si confrontano Vertex IV, ipsometro di Blume Leiss e due applicazioni per cellulare in grado di misurare l'inclinazione dello smartphone è stato riscontrato un errore medio dello 0,80% nel caso di Vertex. In questo caso l'errore relativo (nel nostro caso chiamato errore interstrumento assoluto) è notevolmente inferiore ma questo è probabilmente dovuto al fatto che per tale studio le misurazioni

sono state effettuate su punti di riferimento contrassegnati su edifici, le condizioni in cui si sono svolte tali prove è controllato e non rappresentativo delle reali problematiche che possono sorgere in campo. Inoltre, l'altezza reale dei punti misurati era conosciuta mentre nel nostro caso e nel caso del precedente studio è stimata.

Alla luce di tali osservazioni possiamo affermare che i risultati da noi ottenuti siano verosimilmente in linea con quelli rilevati da studi precedenti.

6.2.1 MOTI (MOBile Timber cruise)

Come nel caso degli errori intrastrumento, attraverso gli istogrammi al grafico 5.5 possiamo notare come l'applicazione MOTI abbia un errore spiccatamente superiore rispetto agli altri ipsometri. In media l'errore è pari a 1,84 m, ovvero il 7,38% con una deviazione standard di 1,61 m. Questo valore, come confermato dai relativi test statistici, è notevolmente superiore agli altri ottenuti. Secondo il rapporto finale redatto dagli sviluppatori dell'applicazione (MOTI, Rapport final, 2014) l'errore medio è pari al 4,4%, quindi inferiore rispetto a quello da noi riscontrato. In alcuni casi sono stati però registrati errori maggiori al 18,7% e da questo dato possiamo quindi capire come, anche in tali rilievi, siano stati frequentemente riscontrati outlier. Sempre secondo questo studio l'accuratezza migliora notevolmente nel caso in cui si ripetano più misurazioni sullo stesso albero e si consideri la media di questi come l'altezza corretta. In particolare, nel caso in cui vengano eseguite 5 misure è stato riscontrato un errore medio del 2,2%. Un tale risultato porterebbe questo strumento alla pari di quelli tradizionali, ma richiederebbe maggiore tempo per determinare l'altezza di ogni pianta, rendendolo quindi meno efficiente. È importante inoltre notare come l'accuratezza delle misure aumenti all'aumentare dell'altezza della palina utilizzata come riferimento alla base.

Sulla base di questi dati possiamo quindi affermare che l'applicazione MOTI non sia abbastanza accurata per essere utilizzata in contesti professionali in quanto, sulle singole misure, fornisce misurazioni con un errore medio troppo elevato. Se si ha l'accortezza di effettuare un numero elevato di misurazioni per ogni albero (da 3 a 5) e si utilizza una palina alta più di 1/10 della pianta stessa si potrebbero invece raggiungere risultati pari a quelli di Vertex, TruPulse, Suunto e Trees. L'utilizzo di una palina di grandi dimensioni, come descritto al paragrafo 6.4, può però causare difficoltà nei rilievi.

6.2.2 Trees

Per quanto riguarda l'applicazione Trees è stato registrato un errore interstrumento assoluto medio di 0,70 m, che corrispondono al 2,72% e ad una deviazione standard di 0,70 m. Tale risultato è perfettamente confrontabile con quelli ottenuti dagli altri strumenti: 2,91% per Vertex, 2,75% per TruPulse e 2,23% per Suunto. La stessa conclusione è stata raggiunta tramite i test statistici di Kruskal-Wallis e dai test post-hoc di Dunn, che hanno determinato come gli errori di questo strumento non siano statisticamente diversi dagli altri, ad esclusione di MOTI e di TruPulse nel caso degli abeti fuori bosco.

Come descritto al capitolo 4.1.5 questa applicazione non è in grado di misurare la distanza tra pianta e operatore in modo autonomo e richiede quindi un secondo strumento per la determinazione di questa. Errori nella misurazione di tale variabile influenzerebbero negativamente l'accuratezza dell'altezza dendrometrica per cui il metodo utilizzato per determinare tale distanza è particolarmente importante. Nel nostro caso è stato utilizzato l'ipsometro TruPulse nella modalità che permette di determinare la distanza topografica.

Poiché tra gli strumenti considerati Trees ha restituito la seconda migliore accuratezza possiamo considerare tale applicazione come alla pari degli strumenti tradizionalmente utilizzati dai professionisti.

6.2.3 Bias ed errori soggettivi

Tramite l'errore intrastrumento è possibile capire se uno strumento abbia un bias, ovvero fornisca misurazioni sistematicamente distorte rispetto al valore corretto, in positivo o negativo (Walther, Moore, 2005).

Il bias può essere legato a diverse variabili, tra le quali figurano problemi di progettazione dello strumento, calibrazione dello stesso e principalmente, come descritto nello studio di Stephen A. Y. Omule (Omule, 1980), ad errori soggettivi commessi dall'operatore, all'ambiente di lavoro ed alle condizioni climatiche. In tale articolo viene riscontrato un bias del 3% nella misurazione delle altezze legato alle ultime tre motivazioni citate. Per il presente studio determinare il bias è particolarmente complicato in quanto, per ottenere dei valori corretti sarebbe necessario conoscere la reale altezza delle piante prese in esame mentre, essendo stato svolto uno studio non distruttivo, la stessa viene stimata come la media di tutte le misurazioni effettuate. La medesima conclusione è stata raggiunta da Hypponen e Roiko-Jokela (Hypponen, Roiko-Jokela, 1978).

Note le problematiche sopra citate andiamo ad elencare i valori di bias da noi calcolati e presentati alla tabella 5.4a. In media Vertex ha un bias di +0,52 m, TruPulse di -0,52 m, Suunto di -0,25 m, MOTI di +0,86 m e Trees di -0,61 m. Le due applicazioni per smartphone presentano perciò il bias più elevato mentre Suunto quello inferiore.

Nello studio svolto da Villasante e Fernandez per Vertex IV è stato riscontrato come non abbia un bias notevole mentre nel 95% delle misurazioni effettuate con le applicazioni per smartphone è presente un bias negativo. Tale errore viene ridotto ma non eliminato in seguito a calibrazione delle stesse. Questo può indicarci come una corretta calibrazione di MOTI possa ridurre il problema mentre, al contrario, una calibrazione mal effettuata possa compromettere le prestazioni dello strumento.

Come sopra descritto gli errori soggettivi possono influenzare negativamente le misurazioni e, come descritto da Kitahara (2010), operatori inesperti commettono errori maggiori durante le misurazioni. In particolare, è stato notato come l'errore nelle misurazioni delle altezze su conifere sia notevolmente diminuito in seguito a sessioni di esercitazione. Nel caso di latifoglie, invece, tale miglioramento non è stato riscontrato. Questo è dovuto al fatto che la determinazione dell'altezza in tali piante è più difficoltosa, per cui per notare il miglioramento degli operatori è probabilmente necessaria una maggiore esperienza degli stessi. Anche nelle nostre analisi, osservando i dati di errore nell'ordine cronologico in cui si sono svolte le misurazioni, è possibile apprezzare una riduzione dell'errore assoluto sia interstrumento che intrastrumento. Osservando il grafico 5.5 è facile notare come nel campione degli abeti fuori bosco (il primo campione sul quale sono stati svolti i rilievi) l'errore sia maggiore rispetto ai campioni successivi. In particolare, per gli abeti fuori bosco l'errore interstrumento assoluto medio del campione è pari a 1,02 m mentre nel campione degli abeti dentro bosco si riduce a 0,86 m. Non è invece possibile apprezzare il miglioramento di accuratezza nel caso delle latifoglie (faggi in questo caso) probabilmente perché nel momento in cui sono stati svolti i rilievi su queste le abilità dell'operatore erano già migliorate.

Oltre ad un miglioramento nell'accuratezza è possibile apprezzare un miglioramento nella replicabilità delle misure dovuto all'esperienza dell'operatore. Osservando il grafico 5.3 vediamo come l'errore

intrastrumento assoluto passi da 1,13 m per il campione degli abeti fuori bosco a 0,99 m per gli abeti dentro bosco a 0,73 m per i faggi fuori bosco per poi risalire a 0,93 m nel caso dei faggi dentro bosco. L'aumento di errore intrastrumento nell'ultimo campione può essere legato alle difficoltà legate al misurare le altezze degli alberi all'interno del bosco o alle problematiche correlate al portamento delle latifoglie.

6.3 Efficienza degli strumenti (tempi necessari ai rilievi)

L'efficienza degli strumenti, come descritto nel capitolo introduttivo, è fondamentale per ridurre i tempi necessari alle indagini in campo e quindi i costi legati a tali operazioni. Secondo le nostre osservazioni l'ipsometro con maggiore efficienza è stato TruPulse con un tempo medio di 19,87 s nel primo rilievo e di 19,4 s nel secondo. Gli unici strumenti a raggiungere tempistiche simili sono stati Vertex e MOTI, ma esclusivamente nella seconda misurazione (ovvero senza considerare le tempistiche necessarie al posizionamento di transponder e palina) dove il tempo medio è stato rispettivamente di 21,19 s e 20,94 s. Questo significa che nel caso in cui si utilizzino tali strumenti aiutati da un secondo operatore che vada a posizionare transponder e palina, si può ottenere un'efficienza pari a quella di TruPulse.

Tenendo invece conto del tempo necessario per tali operazioni, MOTI è lo strumento meno efficiente e Vertex il secondo meno efficiente. Trees e Suunto occupano rispettivamente il secondo e terzo posto per efficienza.

Tempi di misurazione così bassi ottenuti per questi due strumenti che richiedono la determinazione della distanza dalla pianta effettuata con uno strumento diverso dall'ipsometro stesso sono possibili solo nel caso in cui si utilizzi un distanziometro elettronico. Effettuare le stesse operazioni con una cordella metrica renderebbe tali strumenti notevolmente meno efficienti e verosimilmente inferiori a MOTI e Vertex in tal senso.

È inoltre da notare come l'efficienza vada a migliorare di campione in campione in conseguenza all'aumento dell'esperienza dell'operatore. Il tempo che Vertex III richiede per le misurazioni secondo un precedente studio (Božić et al., 2005) è di 17,04 s, se non si tiene conto del posizionamento del transponder. Questo dato ci suggerisce che l'efficienza da noi riscontrata su Vertex e gli altri ipsometri possa essere ulteriormente migliorata in seguito ad una maggiore esperienza nell'utilizzo degli strumenti.

6.4 Influenza di fattori ambientali e pratici nell'utilizzo degli strumenti

Nel presente capitolo vengono espone le problematiche che sorgono nell'utilizzo degli strumenti in condizioni reali. Tali problematiche non sarebbero state notate nel caso in cui gli ipsometri fossero stati utilizzati in un ambiente controllato, come può essere un laboratorio. Queste, infatti, nella maggior parte dei casi non possono essere descritte da criteri oggettivi mentre vengono notate dagli operatori nella loro esperienza personale.

Utilizzando il TruPulse in caso di nebbia, questo non sarà in grado di misurare le reali distanze e di conseguenza le altezze. Anche con nebbia poco densa lo strumento fornirà misurazioni di 4 metri qualsiasi sia la distanza effettiva ed altezze sempre di 4 metri. Tale problematica va a ripercuotersi di

conseguenza sull'utilizzo dell'applicazione Trees e dell'ipsometro Suunto nel caso in cui si usi TruPulse per determinare la distanza operatore-pianta. Essendo uno strumento laser si ipotizza che anche gli altri distanziometri che operano con lo stesso funzionamento possiedano lo stesso problema. In caso di nebbia TruPulse diventa quindi inutilizzabile mentre Trees e Suunto possono ancora essere utilizzate ma risulteranno meno efficienti in quanto sarà necessario determinare la distanza tramite cordella metrica. Se viene utilizzato questo metodo della cordella Trees è in grado di determinare in automatico la distanza topografica mentre per Suunto occorre utilizzare il metodo della coltellazione che rende le operazioni ancora più laboriose.

Per lo stesso motivo, ovvero per il suo funzionamento a laser, TruPulse incorre spesso in errori nelle misurazioni dovuti al fatto che viene intercettato un oggetto più vicino all'operatore (come possono essere arbusti o rami) rispetto al tronco dell'albero che si vuole misurare. Nella maggior parte dei casi tale errore è immediatamente evidente ad un operatore con una minima esperienza, dato che la distanza restituita è inverosimile, ma in un numero inferiore di casi questa non viene notata e porta quindi a rilevazioni errate.

Vertex, funzionando ad ultrasuoni, non diventa inutilizzabile in condizioni di alta umidità, pioggia o nebbia ma queste ne riducono l'accuratezza. Tramite calibrazione questi problemi possono essere ridotti, ma in caso di sbagliata calibrazione si inserisce invece un nuovo elemento di disturbo per l'accuratezza dello strumento. Inoltre, poiché le condizioni atmosferiche variano durante la giornata, per avere risultati i più corretti possibile, occorre effettuare diverse calibrazioni durante i rilievi, rallentando così le operazioni.

Come Vertex anche MOTI può essere calibrato e tale operazione può migliorarne l'affidabilità nel caso in cui tale operazione sia effettuata nel modo corretto, ma può altresì comprometterne la funzionalità nel caso in cui venga effettuata nel modo errato. Un altro elemento che lede la facilità di utilizzo di MOTI è la necessità di utilizzare una palina alta almeno 1/10 della pianta oggetto della misurazione che nel caso di faggi o abeti adulti significa avere una palina alta 3 o 4 metri. Un punto di riferimento così alto implica che in diversi casi la cima dello strumento non sia visibile in quanto coperta da rami bassi o altro: un'impresione nella determinazione della parte più alta della palina comporta una misurazione errata dell'altezza della pianta.

Dato che a volte le misurazioni di altezze vengono svolte in condizioni di pendenza o in zone difficili da raggiungere e l'operatore deve portare con sé diversi altri strumenti per ottenere tutte le informazioni riguardanti il soprassuolo forestale, anche il peso e il volume degli ipsometri ricoprono un ruolo nella facilità di utilizzo degli stessi. In tal senso Trees, Suunto e TruPulse si equivalgono e sono gli strumenti meno ingombranti. Per Trees si utilizza lo smartphone dell'operatore come supporto e l'unico strumento aggiuntivo è un distanziometro laser o una cordella metrica. Suunto ha dimensioni ridotte, un peso di 100 g e come supporti esterni richiede gli stessi strumenti necessari all'utilizzo di Trees. TruPulse 200L pesa appena 220 g, ha dimensioni ridotte e non necessita di supporti esterni. Vertex, che ha un peso di circa 270 g comprensivo dell'ipsometro e del transponder, richiede però l'utilizzo di una cordella metrica nel caso in cui lo si voglia calibrare e solitamente viene trasportato all'interno di una valigetta protettiva visto il costo elevato dello strumento, il che lo rende notevolmente più ingombrante. MOTI, in linea teorica, sarebbe lo strumento meno voluminoso e più leggero in quanto non richiede supporti esterni per la misura della distanza dalla pianta o per la calibrazione, ma tenendo conto della palina finisce per essere il più scomodo da trasportare. La stessa

può però essere sostituita da un segno sulla pianta all'altezza desiderata effettuato con un gesso. Tale accortezza porterebbe lo strumento ad essere il meno ingombrante e pesante.

7. CONCLUSIONI

Tramite i dati di replicabilità, accuratezza, efficienza e facilità di utilizzo degli strumenti valutati in questa tesi, possiamo affermare che le applicazioni per smartphone in certi casi possano essere delle valide alternative agli ipsometri tradizionalmente utilizzati dai professionisti del settore forestale.

In particolare, l'applicazione Trees ha fatto registrare un'accuratezza inferiore solo a Suunto e TruPulse ma comunque migliore di Vertex, con un errore percentuale medio del 2,72 %. Osservando la replicabilità delle misure, Trees è invece seconda solo all'ipsometro Suunto, mentre per quanto riguarda l'efficienza l'unico strumento ad aver fatto registrare performance migliori è stato TruPulse. Anche per quanto riguarda l'utilizzo, questo ipsometro è uno dei più facili da trasportare e presenta poche criticità in condizioni difficili, come in caso di meteo avverso o scarsa visibilità in bosco. Un ulteriore vantaggio è dato dal fatto che l'applicazione è gratuita e gli unici costi da sostenere sono quelli per l'acquisto di un distanziometro e/o di una cordella metrica cosa che la rende estremamente più economico di ipsometri come Vertex e TruPulse.

Lo stesso non si può dire per MOTI che ha invece fornito misurazioni notevolmente inferiori agli altri strumenti, come accuratezza con un errore pari al 7,38% (il peggiore tra i cinque utilizzati) ed una replicabilità delle misurazioni molto bassa con un errore assoluto intrastrumento di 2,76 m, che corrisponde ampiamente alla peggior performance registrata. Anche nell'utilizzo presenta diverse problematiche, spesso legate alla palina che occorre utilizzare come riferimento alla base della pianta che, dovendo spesso essere di un'altezza di 3-4 metri non è ben visibile. Per quanto riguarda le tempistiche di misurazione, nel caso in cui le operazioni vengano svolte da un solo operatore, risulta essere l'applicazione con la minore efficienza.

Uno dei vantaggi è quello legato al costo di tale strumento, in quanto valgono i medesimi ragionamenti esposti per Trees. A riguardo dell'accuratezza le prestazioni dovrebbero migliorare notevolmente nel caso in cui si ripetessero dalle 3 alle 5 misurazioni per ogni pianta e si utilizzasse la media di queste come valore corretto. Così facendo le prestazioni di MOTI dovrebbero essere alla pari con quelle degli altri strumenti. L'efficienza va a migliorare considerevolmente nel caso in cui le operazioni venissero svolte da due operatori invece che da uno: in tale scenario il primo operatore posiziona la palina mentre il secondo effettua le misurazioni. Questo accorgimento rende l'applicazione uno degli strumenti maggiormente efficienti.

Secondo le stime qui esposte in alcuni casi le applicazioni per smartphone sono già ad ora in grado di garantire lo stesso livello di affidabilità degli strumenti comunemente utilizzati per misurare le altezze degli alberi. In particolare, Trees è comparabile se non superiore agli altri ipsometri considerati sotto ogni punto di vista, mentre MOTI non è alla pari, ma se usata prendendo diverse precauzioni può essere utile a supporto degli strumenti convenzionali. Queste considerazioni prefigurano una prospettiva interessante: nel corso del tempo è probabile che le tecnologie attuali prendano gradualmente il sopravvento sulle tradizionali. Questo processo è guidato dalla loro notevole facilità d'uso, comodità e vantaggi in termini di costo. Inoltre, vale la pena notare che queste tecnologie possono essere costantemente perfezionate attraverso test ed aggiornamenti software. Questo scenario è ulteriormente alimentato dalla continua implementazione di innovazioni tecnologiche nei

dispositivi mobili di uso quotidiano, come ad esempio i sensori Lidar presenti nei più moderni smartphone.

In questa cornice, le prestazioni delle applicazioni che stiamo esaminando sono destinate a progredire. Se tali previsioni sono corrette ci stiamo avvicinando ad un futuro nel quale l'unico strumento necessario per effettuare stime dettagliate relative al soprassuolo forestale, quali misurazioni di diametro, altezza dendrometrica e area basimetrica, sarà lo smartphone.

8. BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

“MOTI L’inventaire forestier simplifié par les smartphone. Rapport final”, Mars (2014)

MOTI, materiale online: <http://www.moti.ch/drupal/?q=it>

Laser Technology, Inc. TruPulse® 200L User’s Manual, (2013)

Trees, materiale online: <https://sites.google.com/view/forestmonitoringtools/home>

Vertex III and Transponder T3 manual, Revised September (2005) v.1.4

Bozic M., Cavlovic J., Lukic N., Teslak K., Kos D. “Efficiency of ultrasonic Vertex III hypsometer compared to the most commonly used hypsometers in Croatian forestry.” (2005) Croatian Journal of Forest Engineering 26(2): 91–99.

Hammer, O., Harper, P., Ryan, P.D., “Past: Paleontological Statistics Software Package for Education and. Data Analysis.” (2001) Palaeontologia Electronica, vol. 4, issue 1,

Mikko Hyppönen, Pentti Roiko-Jokela. “Koepuiden Mittauksen Tarkkuus Ja Tehokkuus.” (1978) Folia Forestalia, 356, 1–25.

Kitahara, Fumiaki, Nobuya Mizoue, and Shigejiro Yoshida. "Effects of training for inexperienced surveyors on data quality of tree diameter and height measurements." (2010) Silva Fennica 44.4: 657-667.

Ville Luoma, Ninni Saarinen, Michael A. Wulder, Joanne C. White, Mikko Vastaranta, Markus Holopainen, Juha Hyypä. “Assessing Precision in Conventional Field Measurements of Individual Tree Attributes.” (2017) Forests 8, 38.

Olivier Noiret. “Les smartphones au service de la forêt” (2016) Silva Belgica, mai-juin: 10-14.

Stephen A. Y. Omule. “Personal Bias in Forest Measurements.” (2011) The Forestry Chronicle. 56(5): 222-224.

Antonio Villasante, Cristina Fernandez. “Measurement errors in the use of smartphones as low-cost forestry hypsometers.” (2014) Silva Fennica 48.5.

Bruno A. Walther, Joslin L. Moore. “The concepts of bias, precision and accuracy, and their use in testing the performance of species richness estimators, with a literature review of estimator performance” (2005) Ecography 28: 815_ 829.

9. RINGRAZIAMENTI

In primo luogo, desidero ringraziare il Professor Daniele Castagneri per l'opportunità datami nel realizzare questa tesi e per l'incessante disponibilità nel rispondere ad ogni mio dubbio durante i mesi di raccolta dati e di stesura della tesi.

Un grande ringraziamento va alla mia famiglia per il supporto datomi durante questi tre anni di Università.

Infine, ringrazio il Professor Yuzuru Kimura per la disponibilità nel fornire informazioni relative allo sviluppo e al funzionamento dell'applicazione Trees.