

# Utilizarea scannerului laser terestru în măsurătorile forestiere: cerințe metodologice și precauții necesare la aplicarea în practică

C. Coșofreț, I. Barnoaiea, R. E. Scriban, I. C. Dănilă, M. L. Duduman, O. Bouriaud

Coșofreț C., Barnoaiea I., Scriban R.E., Dănilă I.C., Duduman M.L., Bouriaud O. 2018. TLS in forest inventories: methodology and precautions Bucov. For. 18(2): 137-153

**Abstract.** TLS is also known as ground-based LiDAR which provides the capacity to recreate the 3D vegetation structure with millimeter accuracy. The distance measurement of terrestrial laser scanner Z+F Imager 5010 is based on phase shift measurements which is more accurate than time of flight TLS. The time required for a single scan varies according to the resolution needed. In forestry, TLS is used for the detailed structured modelling of plots and individual trees. Terrestrial laser scanning of trees has been seen as the best alternative to indirect and direct (destructive) measurements of volume. TLS technique provides accurate estimates the location, DBH and tree height from point cloud and besides these measurements can be determined the volume on segments, commercial volume or crown volume. The quality of these metrics depends on the original scan data and their co-registration. We have done TLS measurements in six plots from FundivEurope research project with different slopes, tree density and species composition. The measurements allow us to identify which are advantages and disadvantages of using TLS in forest inventory, but in particular this study draws the attention to the precautions required for an accurate TLS use in biomass estimation.

**Keywords** TLS, forest inventory, point clouds, advantages, disadvantages.

**Authors.** Coșofreț Cosmin (cosmin.cosofret@usm.ro), Barnoaiea Ionuț, Scriban Ramona Elena, Dănilă Iulian Constantin, Duduman Mihai Leonard, Bouriaud Olivier - Ștefan cel Mare University of Suceava, Faculty of Forestry, 13 Universității, 720229 Suceava, Romania.

**Manuscript** received November 15, 2018; revised December 5, 2018; accepted December 15, 2018; online first December 30, 2018.

## Introducere

Scanarea terestră cu laser reprezintă un mod de cartare 3D a suprafețelor mai mici, la nivel de milimetru. Măsurarea distanței cu TLS se bazează fie pe principiul de măsurare «phase-shift», fie pe principiul de măsurare «time of

flight». Principiul de măsurare «time of flight» este același cu cel utilizat în scanarea laser aeriană (ALS). Precizia măsurării distanței în TLS prin «phase-shift» este mai precisă decât TLS cu «time of flight», dar distanța maximă este mai scurtă (Kankare, 2015).

Datele se obțin rapid dacă se utilizează nu-

mai o singură stație de scanare (Liang et al., 2012), dar norul de puncte rezultat este incomplet în majoritatea cazurilor datorită ocluziei, ce creează dificultăți la detectarea arborilor și modelarea trunchiurilor. Ocluzia este cauzată de existența lemnului mort, desimea ridicată și prezența subarboretului în imediata apropiere a locului de scanare (Kankare, 2015).

Stațiile de scanare multiple într-o suprafață de probă oferă date de măsurare mai detaliate, efectul ocluziei fiind redus, dar aceasta necesită mai mult timp de lucru în teren (Holopainen et al., 2013).

Introdusă pentru măsurarea arborilor ca tehnică experimentală din 2004, scanarea terestră cu laser (TLS) a fost considerată ca o alternativă robustă la măsurătorile indirecte și directe (distructive) ale volumului arborilor. Prin scanarea individuală a arborilor, tehnica TLS oferă estimări precise ale volumului pe elemente (Kankare et al. 2013) și poate răspunde nevoilor de a cunoaște atât volumul comercial (buștean), cât și volumul total aerian al arborilor (Hosoi et al. 2006). Mai multe inventare forestiere naționale au început să acorde atenție măsurătorilor cu ajutorul TLS (Franța, Norvegia, Finlanda, Marea Britanie), realizând studii cu caracter exploratoriu pentru a stabili în ce măsură TLS poate fi aplicat pe scară largă în inventarierea forestiere (Liang et al., 2016).

Estimarea biomasei coroanei arborilor reprezintă un subiect de mare interes pentru inginerii silvici și pentru cercetători. Măsurătorile cheie sunt focalizate pe diametrul la înălțimea pieptului (în continuare, dbh) și înălțimea totală a arborilor, uneori împreună cu un alt diametru suplimentar (Kankare, 2015). Înălțimea și dbh sunt apoi transformate în volum sau în biomasă folosind ecuații altitudinale predefinite (de ex. în Ordinul de ministru nr. 1323/2015 privind aprobarea metodelor dendrometrice pentru evaluarea volumului de lemn destinat valorificării și valorile necesare calculului volumului de lemn destinat valorificării). Aceste ecuații, ale căror dezvoltare și calibrare necesită un volum de lucru foarte mare, sunt predispuse la o mare variabilitate spațială ceea ce poate in-

fluența negativ calitatea estimărilor realizate (Eysn et al. 2013).

Scopul articolului este de a prezenta un model de protocol de lucru în teren și de a analiza avantajele și dezavantajele utilizării a scaneului terestru în măsurarea arborilor. În acest sens, s-a evaluat potențialul de utilizare a TLS pentru măsurarea diametrelor arborilor, utilizarea TLS pentru inventarierea în piețe de probă, precum și identificarea principalelor limitări în utilizarea TLS. De asemenea, sunt prezentate și precauțiile necesare în vederea obținerii unor rezultate cât mai precise folosind metoda de lucru expusă.

## Metodologia de lucru

### Suprafețe de probă și dispozitiv de măsurare

În studiul de față s-au scanat 6 suprafețe de probă rectangulare cu suprafața de 900 m<sup>2</sup>, localizate în Ocolul Silvic Râșca, județul Suceava, instalate anterior în cadrul proiectului FP7 FundivEurope (Functional significance of forest biodiversity in Europe).

Măsurătorile de teren s-au realizat cu ajutorul aparatului Z+F Imager 5010, un scanner de mare precizie (precizie de estimare a distanțelor de  $\pm 1$  mm la 25 m), bazat pe tehnologia «phase-shift» și cu distanța utilă de scanare mai mare de 100 m. Lungimea de undă a laserului este de 1500 nm (în infraroșu apropiat).

troduse și folosite pe scară largă în practică La desfășurarea măsurătorilor au mai fost necesare o serie de materiale adiționale: repere sferice confecționate din polistiren (ușoare, dar numeroase și voluminoase), trepiede, picheți metalici, aparat GPS (Garmin 6s), cabluri de alimentare, cuie pentru ancorarea țințelor. De asemenea, pentru o utilizarea mai îndelungată a TLS-ului (în condițiile unei autonomii a acumulatorilor de cca. 2 - 3 ore în condiții de temperaturi scăzute), a fost necesar și un generatorul electric.

Reperle sferice din polistiren cu diametrul de 25 cm, respectiv 40 cm s-au instalat pe pi-

**Tablelul 1** Caracteristicile principale ale suprafețelor de probă alese pentru analizele din cadrul rețelei FundivEurope. *FundiEurope plots characteristics chosen for analysis*

| Piețe de probă | Panta teren (grade) | Desime arboret (nr. arb/ha) | Compoziție       | Suprafață de bază (m <sup>2</sup> /ha) |
|----------------|---------------------|-----------------------------|------------------|--|
| Rasca 01       | 9,5                 | 734                         | 7FA 2CA 1PAM     | 19,72                                  |
| Rasca 06       | 20                  | 656                         | 10FA             | 27,6                                   |
| Rasca 09       | 14,8                | 644                         | 5FA 2PAM 2MO 1BR | 42,24                                  |
| Rasca 17       | 9,2                 | 567                         | 5PAM 4FA 1DR     | 52,46                                  |
| Rasca 51       | 22,3                | 344                         | 10FA             | 37,76                                  |
| Rasca 55       | 38,8                | 456                         | 9PAM 1DR         | 28,76                                  |

cheți metalici, iar pentru a evita mișcarea țințelor în timpul scanării, picheții s-au ancorat cu ajutorul unor cuie de tipul celor folosite la instalarea corturilor.

### Proiectarea schemei de scanare

Scanarea eficientă a arborilor izolați și a suprafețelor de probă presupune alegerea corectă a poziției stațiilor din care se efectuează scanări-

le, cu o poziționare a reperelor astfel încât să se asigure vizibilitatea din fiecare stație spre minim trei repere fixe (Eysn et al. 2013).

În cazul suprafețelor de probă rectangulare, o schemă de poziționare a stațiilor din care se face scanarea și a reperelor fixe pe durata scanării este prezentată în figura 1. Schema se adaptează condițiilor locale de arboret, existând posibilitatea modificării poziției stațiilor sau a reperelor cu 1 - 2 m, în funcție de dispunerea



**Figura 1** Aparatul scanner terestru laser (TLS) scanează o suprafață de probă. Reperele sferice sunt folosite pentru a fuziona mai multe scanări și a crea un nor de puncte 3D cât mai complet (Foto: O. Bouriaud) *TLS scanning a plot. Spheric targets are used for coregistration to create a 3D point cloud*

arborilor, a ochiurilor de semințis, a lemnului mort sau de prezența unor zone specifice (de ex. stâncării). Schema de scanare poate fi îndesită cu stații suplimentare atunci când dispunerea arborilor este neuniformă (incluzând zone cu desime mare a arborilor), atunci când apar zone de stâncărie, zone cu lemn mort sau cu multe resturi de exploatare. În medie, conform experienței de teren, pentru fiecare suprafață de probă, poziționarea reperelor și a punctelor de scanare durează cel puțin o oră.

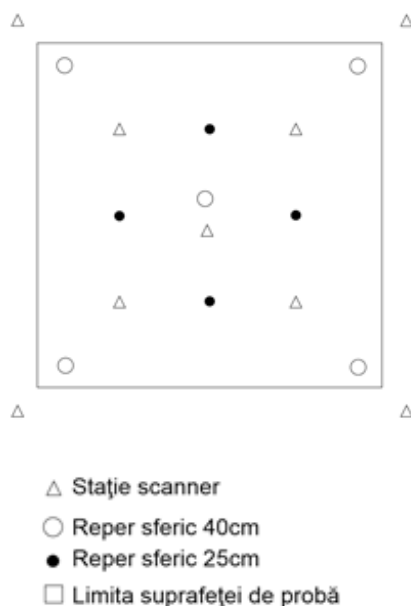
În cazul arborilor izolați trebuie să se asigure vizibilitatea minimă din trei stații diferite asupra aceluiași detaliu. Pentru o vizibilitate bună asupra reperelor din toate stațiile, acestea trebuie să fie instalate la o distanță suficient de mare față de arbore (figura 2).

### Coregistrarea, selectarea și filtrarea arboretelor și extragerea parametrilor

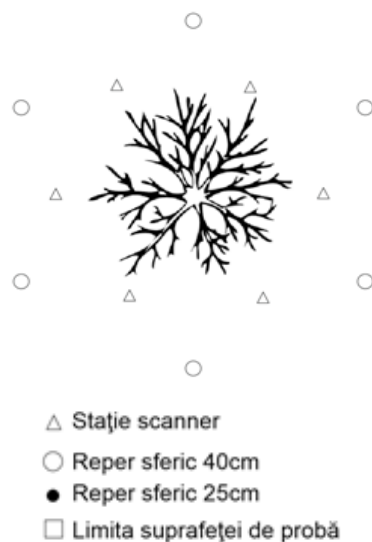
#### Coregistrarea

Rezultatul scanării este un nor de puncte cu precizie ridicată, mai ales pentru acei arbori care se află în apropierea aparatului (până la o distanță  $\approx 20$  m). Deoarece în cazul scanărilor multiple rezultă mai mulți nori de puncte, în funcție de poziția scannerului este necesară o operațiune intermediară numită coregistrare. Realizarea unei coregistrări corecte permite o precizie extrem de mare (la nivelul de milimetru) în estimarea poziției arborilor și a mărimilor de bază (diametru și înălțime), după cum o coregistrare incorectă generează erori foarte mari, ce nu pot fi puse în nici un caz pe seama preciziei de măsurare a aparatului.

Coregistrarea se poate face cu repere fixe (colțuri), repere clasice (discuri metalice) sau repere sferice. În scopul asigurării unei precizii cât mai ridicate, am experimentat mai multe tipuri de repere, iar pentru fiecare dintre acestea am încercat mai multe dimensiuni, materiale și substanțe sau materiale de identificare/inscripționare a reperului. Pentru scanarea unui arboret cu densitate mare, pantă mare și subarboret prezent precum cele în care s-a desfășurat stu-



**Figura 2** Poziționarea optimă a stațiilor și a reperelor într-o suprafață de probă de 30x30 m  
*Optimal positioning of TLS and targets in a plot of 30x30 m*



**Figura 3** Exemplu de schemă optimă de alegere a poziției stațiilor și reperelor pentru scanarea unui arbore izolat  
*Optimal scheme for selecting the TLS positions and targets for an isolated tree*

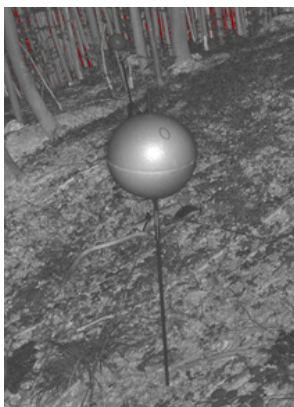
diul, cele mai practice repere s-au dovedit a fi sferele din polistiren, deoarece sunt mai ușor de identificat și vizualizat din mai multe poziții de scanare. De altfel, polistirenul se dovedește un material cu o reflectanță extrem de bună a razelor din infraroșu apropiat, emise de dispozitivul TLS utilizat.

Reperele sferice vizibile se înregistrează la fiecare scanare. În acest sens, se recomandă ca fiecare reper să fie dublu identificat: prin notarea numărului de pe reper (figurile 4a, 4b) iar dacă numărul inscripționat pe reper nu este vizibil, numărul poate fi identificat cu ajutorul benzilor reflectorizante de pe trepied, respectiv țărșuș. Pentru a ușura munca depusă la coregis-

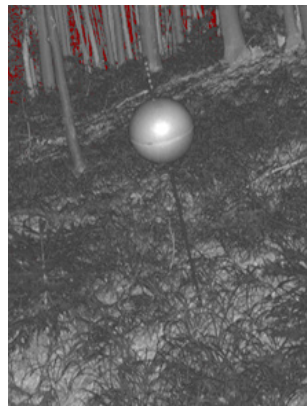
trare, cu ajutorul unui carnet de teren se verifică poziționarea sferelor și numărul sferelor vizibile din fiecare stație (figurile 2 și 3).

În funcție de numărul de puncte utilizat la recrearea unui reper sferic se determină calitatea înregistrării acestuia. Calitatea înregistrării se poate încadra în trei categorii, surprinse pe coduri de culori: verde (>70%), galben (50-70%) și roșu (<50%) (figura 5). Pentru coregistrare se pot utiliza și reperele cu o calitate a înregistrării sub 50%, dar acestea pot duce rapid la scăderea preciziei coregistrării.

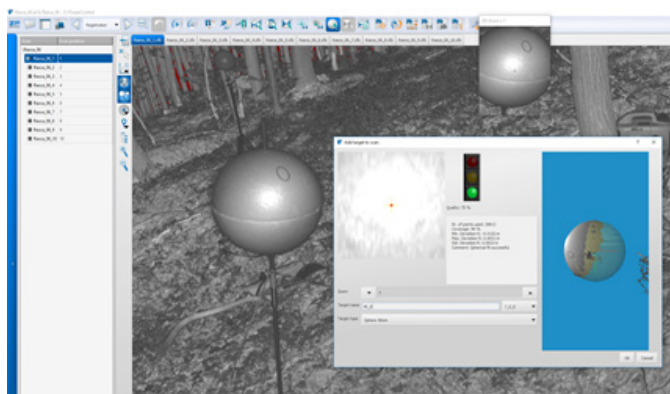
Pe scanarea coregistrată se poate observa că fiecare reper are număr de identificare iar punctele mici de culoare verde arată unde au



**Figura 4a** Număr de identificare reper cu diametru 40 cm, vizibil după scanare  
*Spheric Target (40 cm) ID identifiable on scan*



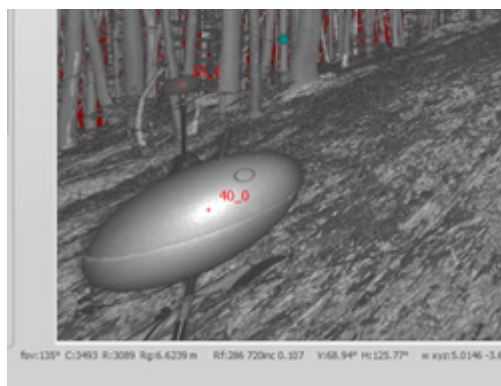
**Figura 4b** Mod de identificare a numărului țărșușului vizibil după scanare  
*Identification of stake's ID on scans*



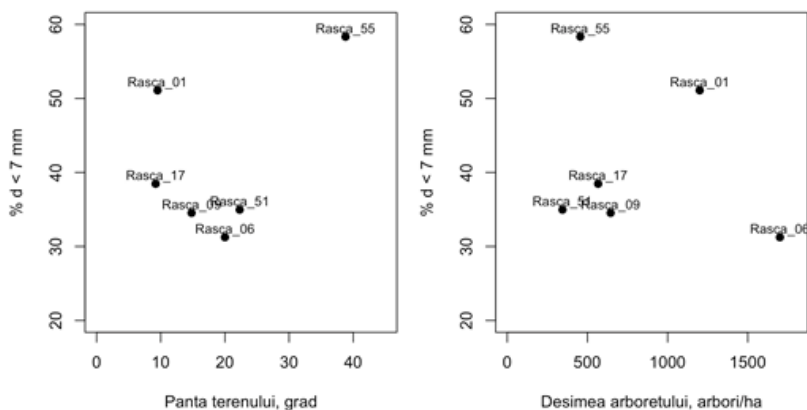
**Figura 5** Înregistrarea unui reper sferic cu diametrul de 40 cm  
*Coregistration of spheric targets with diameter of 40 cm*

mai fost poziționate stațiile scanner în suprafața de probă (figura 6).

Pe baza coregistrării a fost calculată eroarea medie de poziționare spațială a țintelor pentru fiecare suprafață de probă în parte. Programul de coregistrare preconizează folosirea țintelor pentru o eroare mai mică de  $d = 7$  mm. Proportia țintelor care se află sub pragul de 7 mm este un indicator al calității coregistrărilor. Proportia țintelor care corespund unei erori mai mici de 7 mm poate varia de la 35 la 58% în funcție de condițiile de teren, arboret și meteo. De aceea, nu există relații



**Figura 6** Rezultatul reperelor coregistrate pe scanare  
*Results of targets coregistration*



**Figura 7** Relația dintre panta terenului (stânga) sau desimea arboretului (dreapta) și proporția țintelor cu precizie de poziționare sub 7 mm.

*The relationship between the slope (left) and stand density (right) and target proportion with a positioning accuracy of less than 7 mm.*

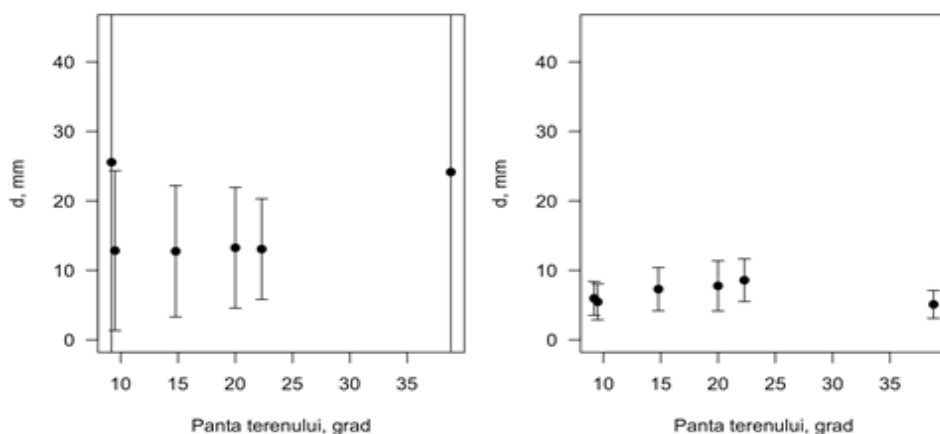
definite între proporția țintelor cu eroare mai mică de 7 mm și panta terenului sau desimea arboretului (figura 7). În cazul de față, valoarea maximă a proporției este obținută în suprafața Rasca 55, cu panta cea mai mare, iar în suprafața Rasca 01 cu o desime mare ( $> 1000$  arbori/ha) a rezultat o proporție ridicată de peste 50%.

Pe baza celor 10 scanări efectuate în suprafața de probă s-a obținut o eroare medie de poziționare de 10 - 15 mm în cazul folosirii tuturor țintelor și chiar sub 10 mm dacă sunt folosite țintele cu o vizibilitate bună în teren (figura 8). La o eroare medie de poziționare de 14 mm, nu se pot observa efectele unor variabile precum panta sau desimea arboretului asupra performanței coregistrării.

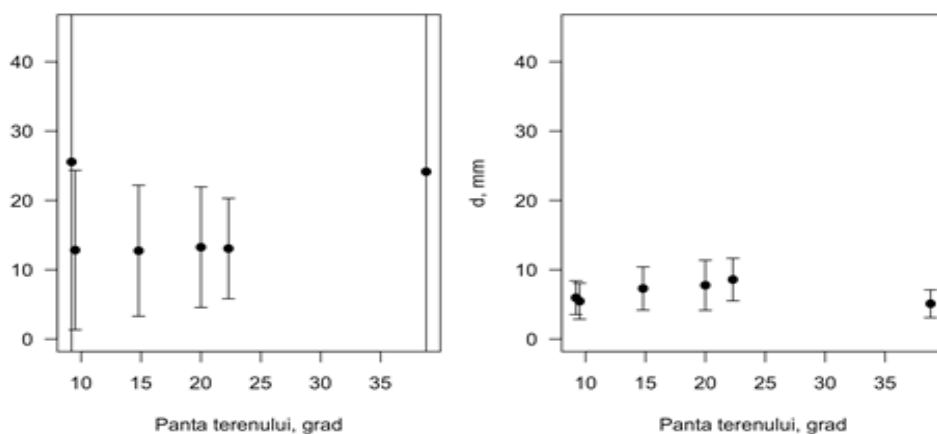
Selectarea norului de puncte corespondent unui arbore

În majoritatea cazurilor, identificarea speciei este posibilă și pe scanarea rezultată. Este însă recomandat, pentru siguranță, ca determinarea speciei să fie făcută pe teren.

Selectarea norului de puncte corespondent unui arbore se face din modulul Preprocessing al programului Z+F Laser Control. După selectarea arboretului, se creează automat o cu-



**Figura 8** Eroarea medie de poziționare ( $\pm 1$  s.d.) pentru toate țintele din suprafața de probă (stânga) și pentru țintele care se încadrează sub pragul de poziționare de 14 mm (dreapta)  
*Mean positioning error ( $\pm 1$  s.d.) for all targets from plots (left) and for all targets with mean positioning error under 14 mm mean positioning error (right)*

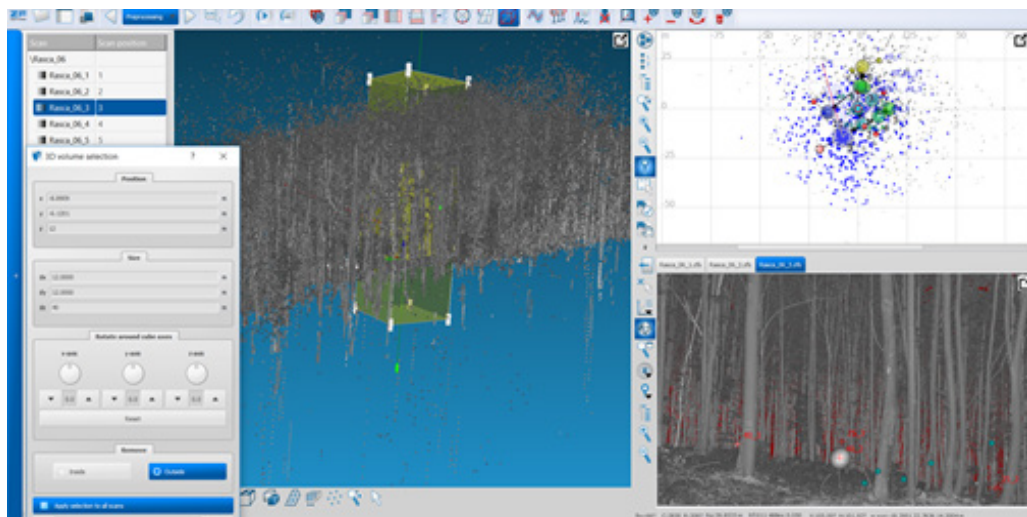


**Figura 9** Relația dintre calitatea înregistrării reperelor și panta terenului (stânga) și desimea arboretului (dreapta)  
*The relationship between the quality of targets coregistration and plot's slope (left) and stand density (right)*

ție tridimensională cu ajutorul modulului 3Dvolume, iar la introducerea dimensiunilor aproximative ale coroanei ( $dx$  și  $dy$ ) trebuie să se țină cont ramurile întrepătrunse și de panta terenului (figura 10). Pentru a limita problemele de detecție și erorile de reconstrucție a arborilor, norii de puncte au fost verificați individual pentru fiecare scanare în parte.

#### Filtrarea punctelor

Filtrarea punctelor rămâne o etapă importantă în prelucrarea datelor TLS, deoarece o rază poate fi parțial interceptată dacă atinge o ramură sau o frunză și sunt posibile și unele reflexii multiple și difracții, ce pot genera înregistrări multiple și false, cunoscute sub numele de “puncte fantomă”.



**Figura 10** Selectarea norului de puncte corespunzător unui arbore  
*Point cloud selection correspondent of a tree*

Erorile de înregistrare sunt primele puncte care trebuie eliminate prin procedeul de filtrare, împreună cu elementele arboretului precum arbuștii. În momentul de față, scanările sunt prelucrate cu ajutorul programelor dezvoltate de constructorii tehnici ai scannerele (Leica Cyclone, Faro, Z+F Laser Control) care dispun de filtre ce elimină punctele din cer, "punctele fantomă", etc. Toate aceste filtre au fost dezvoltate pentru aplicațiile clasice ale TLS-ului, precum arhitectura, însă nu sunt adaptate estimărilor de biomasă ale arborilor.

Filtrele puternice pot elimina din norul de puncte elemente care ar fi trebuit păstrate, însă pragul de sensibilitate nu poate fi aplicat fără a face înaintea o verificare a filtrului pentru fiecare scanare în parte. Ramurile ridice probleme mari, deoarece norul de puncte ce constituie ramura poate fi întrerupt în mai multe fragmente, datorită întrepătrunderii coroanelor arborilor. Prin urmare, proprietățile filtrului ar trebui să depindă de poziția scanării. Ca exemplu, în partea de jos filtrul trebuie să fie mai puternic decât în partea de sus, unde un fragment al unei ramuri ar putea fi interpretată ca o greșeală de înregistrare, apărând ca un cluster de puncte izolate.

#### Extragerea dimensiunilor arborilor

Extragerea parametrilor, mai exact estimarea diametrului și a înălțimii totale a arborilor reprezintă o problemă ce a fost discutată destul de mult în literatură (Hopkinson et al. 2004, Maas et al. 2008, Olofsson et al. 2014). În acest sens, se folosesc două metode diferite: (1) măsurători manuale, bazate direct pe norul de puncte fără prelucrarea lor, și (2) măsurători obținute după identificarea și reconstrucția arborilor.

Prima metoda oferă o precizie foarte bună și este ușor de implementat, dar nu exploatează toată capacitatea unui set de date de tip 3D. Asocierea dintre măsurătorile manuale ale diametrului cu estimările bazate pe scanări (fig. 11), efectuate în teren este foarte frecventă (Hopkinson et al. 2004).

A doua metodă presupune folosirea unor algoritmi foarte complecși, pentru a reuși:

- (i) deosebirea punctelor care reprezintă solul de punctele care reprezintă vegetația forestieră;
- (ii) crearea modelului digital al terenului;
- (iii) identificarea trunchiurilor arborilor (detectarea automată a arborilor);
- (iv) reconstruc-



**Figura 11** Diametrul la 1.3 m măsurat pe scanare  
*DBH measured on scan*

ția arborilor.

În general, primele două etape sunt realizate cu succes în mod automat fără să creeze probleme, chiar dacă prelucrarea unui nor de puncte rezultă din fuzionarea mai multor scanări presupune utilizarea unei capacități de calcul destul de importante. De exemplu, pentru o suprafață de probă cu 8 poziții de scanare, datele au reprezentat în jur de 60 GB, fiind necesar a fi stocate în RAM pentru a reuși și procesarea lor.

Pentru următoarele două etape, literatura prezintă rezultate contrastate și oarecum nesatisfăcătoare. Identificarea trunchiului rămâne o problemă dificilă în arboretele cu subetaje sau cu desime mare din cauza ocluziei. Xia et al. (2015) au dezvoltat un algoritm specific pentru arboretele foarte dese (desimea de 5000 de arbori/ha), dar au concluzionat că cel mult 88% din toți arborii sunt detectați. Astrup et al. (2014) au arătat că, într-un arboret matur, erorile de detecție automată a arborilor sunt semnificative pentru o distanță mai mare de 6 m. Heinzel and Huber (2017) și Cabo et al. (2018) indică o rată de succes în detectarea automată a arborilor de peste 90%, dar admit că multe detecții false trebuie identificate și corectate. Erorile de detecție sunt cu atât mai importante cu cât arborii sunt de dimensiuni mici.

## Rezultate din aplicarea protocolului de măsurare

### Timpul de prelucrare al datelor

Pentru inventarierea unei suprafețe de probă cu aparatul TLS, pentru descărcarea datelor și coregistrare sunt necesare câteva ore; timpul necesar poate să crească însă exponențial, în funcție de pragul de precizie dorit. De asemenea, vizibilitatea scăzută a reperelor poate genera dificultăți la coregistrarea reperelor. Timpul necesar pentru obținerea unui nor 3D bine coregistrat este considerabil.

### Precizia măsurătorilor

Precizia efectuate cu aparatul TLS este condiționată de coregistrare. O coregistrare corectă permite o precizie reală la nivelul unui milimetru în estimarea poziției arborilor și a mărimilor de bază (diametru și înălțimea). De aceea o poziționare atentă a reperelor este extrem de importantă pentru a garanta o bună vizibilitate a lor și deci o bună precizie a scanărilor multiple. Conform măsurătorilor făcute în teren, aparatul poate să obțină o poziționare foarte bună a centrului reperelor chiar la distanțe mai mari de 40 m. În teorie, distanța este de 100 m, dar la astfel de distanțe poziționarea lor riscă să nu fie citită corect de aparat datorită obturării reperelor de către alți arbori. De aceea, o distanță de 30 sau 40 m este suficientă pentru inventarierea suprafeței de probă.

Numărul de repere active este, desigur, un alt factor important pentru a asigura precizie în coregistrare. Numărul minim de repere active este de 3. Un reper parțial vizibil și localizat imprecis nu poate fi folosit pentru coregistrare. Astfel, chiar dacă scanarea prezintă mai mult de 3 repere, unele obturații pot conduce la eliminarea unui reper din coregistrare. În urma măsurătorilor pe care le-am efectuat, nivelul de precizie a coregistrării a fost suficient de bun pentru a realiza un inventar complet.

### Extragerea automată a datelor

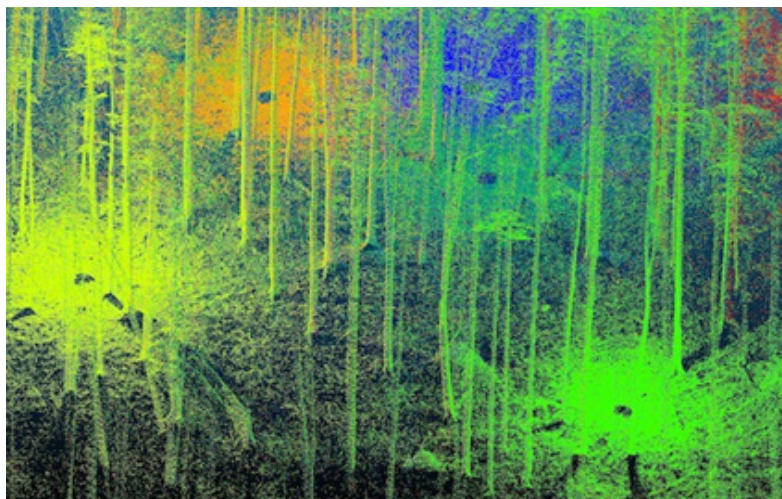
La momentul de față, extragerea informațiilor prin prelucrarea datelor nu este doar o operațiune de rutină. Cu ajutorul TLS-ului este posibilă măsurarea caracteristicilor arborelui cum ar fi diametrul la 1,3 m, înălțimea și poziția arborelui (Hopkinson et al., 2004; Pfeifer and Winterhalder, 2004; Vastaranta et al., 2009; Liang et al., 2012) dar pentru ca rezultatele să fie bune trebuie inclusă și o etapă preliminară de „curățire” a norilor de puncte. Pentru reconstituirea arborilor, segmentarea unui arbore din norul global de puncte, curățirea norului și calculul propriu-zis al modelului structural sunt necesare de la câteva ore până la câteva zile de lucru.

Etapă de identificare a trunchiurilor reprezintă un proces dificil și lung. Ramurile lăcomie sau care prezintă înfurcări pot fi interpretate ca un arbore individual, în condițiile în care baza arborelui nu este vizibilă în întregime. Vizibilitatea tuturor arborilor nu poate fi controlată de teren. Crearea unei rețele dese de puncte de măsurare (figura 12) reduce riscul de a pierde o parte importantă a volu-

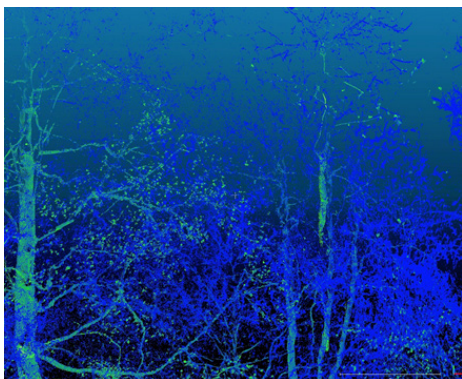
mului 3D, fără a fi totuși o soluție optimă.

O limitare importantă în inventarierea efectuată cu aparatul TLS este dată de prezența subarboretului, care maschează baza arborilor, astfel încât în anumite situații practic devine imposibilă stabilirea nivelului de 1,3 m pe trunchiul arborelui (Chasmer et al. 2006; Hilker et al. 2012). Această problemă compromite toate măsurătorile biometrice: diametrul, volumul, înălțimea totală, pentru că toate depind de o poziționare corectă a distanței de 1,3 m față de nivelul solului. Prezența unei cioate, a unui grup de arbuști, a unor deformări ale terenului sau a unui arbore căzut la sol sunt tot atâtea situații în care nivelul solului nu este direct vizibil pentru TLS.

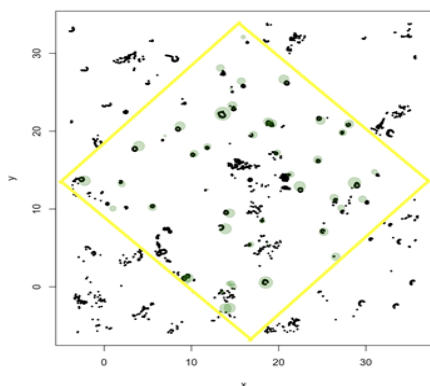
Practic, pentru a identifica din norul de puncte nivelul de referință de 1,3 m, trebuie creat un model digital al terenului. Desigur o interpolare este posibilă acolo unde nu se poate observa solul, dar precizia scade drastic, iar orice eroare de estimare a nivelului va avea consecințe directe asupra estimării înălțimilor. După Hilker et al. (2012), reconstituirea altitudinii terenului pentru o suprafață de probă cu o latură egală cu 30 m poate conduce la erori de



**Figura 12** Nor de puncte de tip 3D rezultat din fuziunea mai multor scanări (fiecare punct de scanare în care a fost instalată stația având câte o culoare specifică).  
*Point cloud 3D resulted from scans coregistration (every scan position has a different color)*



**Figura 13** Exemplu de coroane întrepătrunse  
*Close trees canopy*

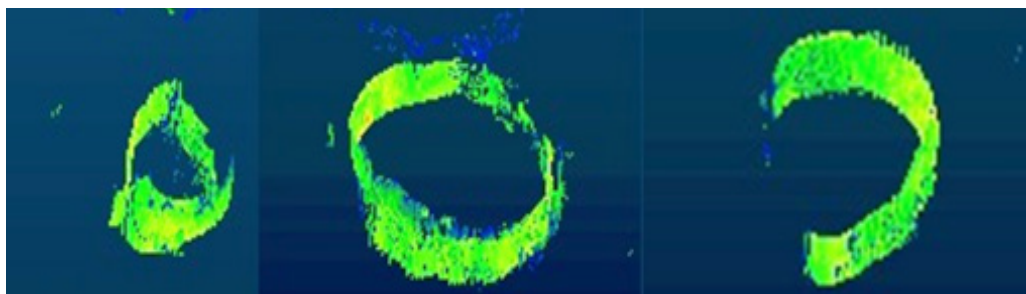


**Figura 14** Corespondența poziționării arborilor bazată pe măsurători clasice (verde) cu măsurătorile efectuate cu aparatul TLS  
*Correspondence of tree positioning based on classic measurements (green) with TLS measurements*

până la 0,5 m, chiar dacă au fost folosite 5 poziții. În cel mai rău caz pot apărea chiar erorile sistematice. Pentru a elimina aceste erori se folosește creta care ajută la marcarea arborilor printr-o bandă la punctul de referință de 1,3 m deoarece creta devine vizibilă pe scanare prin reflectanța modificată.

Unele articole științifice publicate prezintă algoritmi de identificare și măsurare automată a arborilor dintr-o suprafață de probă, dar exemplele prezentate în aceste articole sunt mai degrabă cazuri particulare: arborete pe teren fără pantă, fără subetaj al arborilor și în care coroana arborilor este foarte bine delimitată și nu este întrepătrunsă. Un arboret de gorun bătrân poate oferi aceste condiții, dar testele realizate de noi în făgete au arătat că deosebirea coroanelor arborilor rămâne dificilă chiar și pentru acei arbori situați foarte aproape de scanner (figura 13).

În privința poziționării arborilor, aceasta se poate realiza la un nivel de precizie inegalabil doar cu două sau trei scanări ale arborilor dintr-o suprafață de probă pe un teren cu panta de 45 grade. În figura 14 prezentăm o comparație între poziționarea arborilor în baza inventarului clasic și a norului de puncte TLS la 1,3 m. Concordanța este foarte bună, în ciuda faptului că există subarboret în unele locuri, care ar fi putut bloca unda laser.



**Figura 15** Exemple de trunchiuri cu formă atipică (stânga) și de trunchi parțial scanat din cauza obturației (dreapta). Segmentele prezentate au 10 cm înălțime și sunt prelevate de pe scanări efectuate de la nivelul de 1,25 m la nivelul de 1,35 m  
*Stems with different shapes (left) and stem partial scanned due to occlusion (right). The segments have 10 cm height and are measured on scans at 1.25 m and 1.35 m*

## Utilitatea TLS pentru estimările de biomasă

Măsurătorile efectuate ne permit să concluzionăm că, pe de o parte, estimarea diametrului este foarte bună și nu pune dificultăți, dar pe de altă parte, estimarea înălțimii nu este suficient de bună în unele cazuri. Dacă estimările de biomasă sunt bazate pe diametru și înălțime și o ecuație, utilitatea TLS este afectată în sensul în care, în anumite situații, nu se poate măsura înălțimea unor arbori.

În același timp, trebuie remarcat faptul că volumul aerian poate fi estimat direct din măsurătorile TLS, fără a mai utiliza ecuații de biomasă. În acest caz, eroarea creată de eșantionajul deficitar în elementele foarte fine ale arborelui are consecințe scăzute asupra estimării volumului. Aceasta deoarece contribuția elementelor fine rămâne mult sub nivelul de eroare al estimărilor volumului total aerian. Astfel, respectarea precauțiilor de scanare, a cerințelor de coregistrare corect efectuată și aplicarea unor filtre potrivite ar trebui să permită estimări directe ale volumului arborilor de precizie extrem de ridicată.

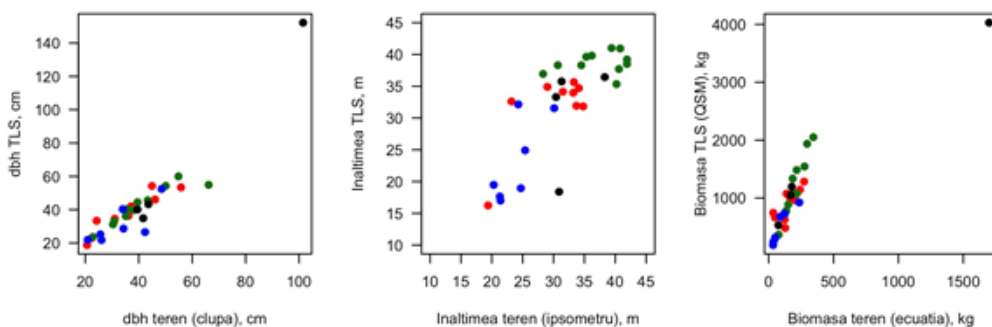
Incertitudinea sau erorile legate de convertirea volumului în biomasă nu sunt discutate aici și nu au fost testate. Calibrarea unor valori de densitate a lemnului constituie o etapă probabil dificilă datorită faptului că densitatea lem-

nului variază semnificativ de la un arbore la altul, deși la nivel de arboret abaterile față de o medie ar trebui să se compenseze.

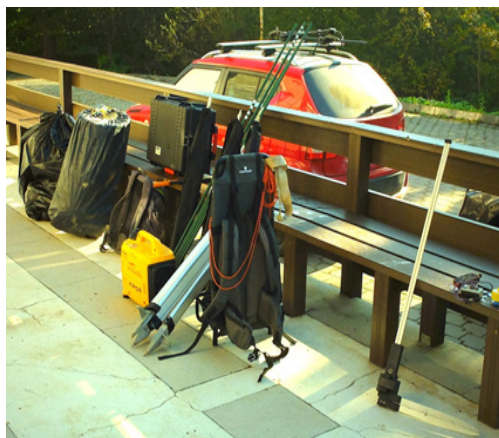
Ușurința de utilizare în teren. Pentru a transporta echipamentul până la punctul de inventar este nevoie de cel puțin 3 persoane. Pe viitor, dacă autonomia acumulatorilor ar fi mai mare s-ar putea efectua mai multe scanări și s-ar putea renunța total la generator care reprezintă o masă importantă. În condițiile prezente, materialul necesar pentru inventarierea cu TLS reprezintă între 30 și 50 kg, ceea ce este considerabil mai mult decât materialul de transportat în cazul unei inventarieri clasice.

Transportarea aparatului propriu-zis reprezintă o problemă deoarece aparatul trebuie ferit de orice șoc sau vibrații, chiar dacă este livrat într-o cutie specială ce îi oferă o protecție foarte bună. Este recomandată utilizarea unui cadru de portare pentru transportarea aparatului în pădure.

Aparatele mai moderne au progresat în privința greutateii, fiind cu  $\approx 5-8$  kg mai ușoare, pentru aceeași rezoluție sau distanță utilă. În schimb, puterea laserului scade ușor și lungimea de undă este diferită. Deoarece în cazul acestor aparate lungimea de undă este apropiată de vârful de absorbție a apei, returul (lumina reflectată) este mai mic, prin urmare norul de puncte devine mai imprecis. Astfel potențialul



**Figura 16** Corespondența între măsurătorile clasice și cele TLS ale diametrului, înălțimii și volumului pentru arbori reprezentativi eșantionați în mai multe suprafețe de probă (culorile deosebesc suprafețele de probă).  
*Correspondence between classic measurements and TLS measurements of DBH, height and volume for sampled representative trees in different plots (different color per plot)*



**Figura 17** Comparație între echipamentul necesar pentru inventariere: inventariere clasică (dreapta) versus inventariere cu TLS (stânga). Foto: O. Bouriaud  
*Comparison between equipment used in inventories: classic measurements (right) versus TLS measurements (left)*

de folosire a aparatelor moderne în pădure este mai redus, deși acestea prezintă avantajul de a fi mai ușoare.

Transportarea aparatului propriu-zis reprezintă o problemă deoarece aparatul trebuie ferit de orice șoc sau vibrații, chiar dacă este livrat într-o cutie specială ce îi oferă o protecție foarte bună. Este recomandată utilizarea unui cadru de portare pentru transportarea aparatului în pădure.

Aparatele mai moderne au progresat în privința greutateii, fiind cu  $\approx 5 - 8$  kg mai ușoare, pentru aceeași rezoluție sau distanță utilă. În schimb, puterea laserului scade ușor și lungimea de undă este diferită. Deoarece în cazul acestor aparate lungimea de undă este apropiată de vârful de absorbție a apei, returnul (lumina reflectată) este mai mic, prin urmare norul de puncte devine mai imprecis. Astfel potențialul de folosire a aparatelor moderne în pădure este mai redus, deși acestea prezintă avantajul de a fi mai ușoare.

## Măsuri de precauție la efectuarea măsurătorilor în suprafețele de probă

### Precauții la aplicarea în teren a protocolului de măsurare

Din experiența utilizării TLS în cele 6 suprafețe de probă cu scanări multiple rezultă că la alegerea efectivă a punctelor de stație și a poziției reperelor trebuie ținut cont de o serie de aspecte, după cum urmează:

- (i) Punctul de stație trebuie să asigure securitatea instrumentului și a operatorului; pentru aceasta se evită locurile stâncoase, care nu permit fixarea picioarelor tripiedului, sau zonele cu lemn mort la sol, care prezintă riscul de transmitere de vibrații sau șocuri în cazul unei deplasări a personalului în timpul scanării;
- (ii) Se evită instalarea aparatului la mai puțin de 2 m de arbori sau repere, deoarece se produce obturarea câmpului de scanare, iar densitatea punctelor devine foarte variabilă pe diferitele fațete ale detaliului scanat;
- (iii) Instalarea reperelor nu trebuie să blocheze culoarele de deplasare de la o stație la alta, ceea ce ar putea duce la mișcarea accidentală a reperelor în timpul scanării (se ia în considerare durata totală a scanării întregii suprafețe de probă);
- (iv) Din fiecare stație trebuie să se verifice vizibilitatea a cel puțin trei repere, prin colimatorul aparatului (situat sub oglindă);
- (v) Stațiile instalate în afara suprafețelor de probă trebuie să fie situate în afara limitei exterioare a coroanei, pentru o scanare eficientă. Etapa premergătoare a scanării este inventarierea clasică, iar durata de efectuare a măsurătorilor este de 1 oră și 30 de minute pentru 3 persoane pentru a putea poziționa, măsura diametrul și înălțimea totală pe o suprafață de 30x30 m. Wilkes et al. (2017) recomandă o marcarea a pozițiilor de scanare chiar înainte de a începe măsurătorile și estimează că timpul necesar este de 1 oră.

Timpul necesar scanării propriu-zise depin-

de rezoluția și de unghiul orizontal selectat. O scanare variază de la 3 minute și 30 de secunde la 13 minute pentru rezoluțiile ridicate necesare inventarului. În practică se recomandă ca unghiul orizontal să fie de 360° pentru ca norul de puncte din exteriorul suprafeței de probă să fie ușor de eliminat la prelucrare. Eliminarea zonei exterioare a suprafeței de probă scanate permite un anumit câștig de timp dar în schimb se pierde prea multă informație. În mod practic, timpul necesar pentru măsurarea unei singure suprafețe de probă este de cel puțin 4 ore dacă se execută între 9 și 11 scanări.

### Restricții legate de condițiile meteorologice

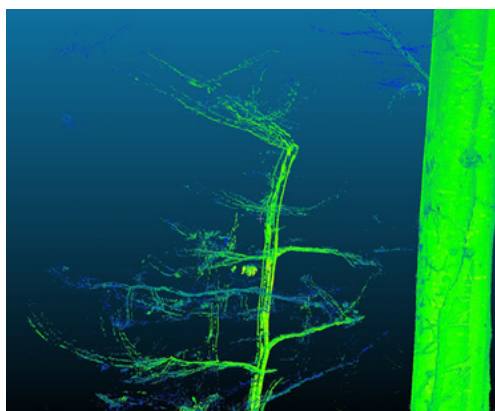
Una dintre cele mai importante restricții ale metodei TLS este dată de necesitatea scanării arborilor fără frunze (perioada noiembrie-aprilie) deoarece acestea maschează complet partea superioară a coroanei arborilor. Astfel, ramurile nu pot fi scanate și nici înălțimea totală a arborelui nu poate fi estimată prin scanările efectuate.

Condițiile meteorologice și durata zilei sunt alți factori care condiționează scanarea. Apa absoarbe o mare parte a luminii emise de laser. Astfel, un trunchi umed nu va mai reflecta la fel de mult și poate crea așa numitele măsurători “fantomă”.

De asemenea, ploaia sau chiar ceața împiedică măsurătorile din cauza absorbției razelor laser. Acest lucru diminuează drastic practi-

cabilitatea aparatului, mai ales în condițiile în care arborii trebuie scanați toamna sau iarna când fenomene precum ceața sau ploaia pot avea o frecvență mai ridicată.

O ultimă condiție care trebuie îndeplinită este aceea de absență a vântului. În prezența vântului, există un risc ridicat ca țintele să fie mișcate în timpul scanării, iar precizia coregistrării scade drastic. Deasemeni, scade și precizia scanării în sine o dată cu mișcarea detaliului scanat. În figura 18 este prezentată imaginea unui arbore scanat într-o zi în care vântul sufla cu 14 km/h, uneori în rafale atingând peste 25 km/h. Se poate observa faptul că trunchiul arborelui este scanat cu claritate deoarece nu s-a mișcat, în timp ce ramurile sunt neclare.



**Figura 18** Ramuri scanate în condiții meteorologice nefavorabile de vânt  
*Scanned branches in windy conditions*

**Tabel 2** Număr scanări pe fiecare piață de probă  
*Number of scans of plots*

| Piața de probă | Număr scanări | Număr scanări utilizate la coregistrare | Număr repere instalate |
|----------------|---------------|---|------------------------|
| Rasca 01       | 10            | 9                                       | 9                      |
| Rasca 06       | 10            | 9                                       | 9                      |
| Rasca 09       | 8             | 8                                       | 9                      |
| Rasca 17       | 11            | 8                                       | 9                      |
| Rasca 51       | 9             | 9                                       | 9                      |
| Rasca 55       | 5             | 3                                       | 5                      |

Ținând cont de aceste impedimente, ferestrele meteorologice propice inventarierii cu TLS-ul sunt destul de puține, în special în zonele de munte. Pe de altă parte, inventarierea clasică au și ele limitări datorate condițiilor meteorologice nefavorabile.

## Concluzii și recomandări practice

Poziționarea și măsurarea unor parametri de bază necesari inventarierii sunt fezabile chiar și în condiții grele, cum ar fi pădurile cu pantă, desime mare sau prezența rășinoaselor. Printr-un număr suficient de scanări se pot compensa toate aceste dificultăți.

Unele constrângeri de timp și de condiții meteorologice pot limita aplicabilitatea metodei, care nu poate fi implementată la scară mare, ci trebuie folosită doar în situațiile în care este nevoie de o precizie ridicată. Într-adevăr, gradul de precizie al unei inventarierii forestiere clasice este suficient pentru aplicațiile pe care le are. În fapt, TLS are un alt spectru de utilizare, care îl face precis și adaptat pentru utilizări de cercetare, însă ineficient din punctul de vedere al timpului și al condițiilor practice de utilizare în cazul inventariierilor forestiere obișnuite.

Contrar unor opinii din literatură (Apostol et. al. 2018), precizia măsurătorilor obținute cu ajutorul TLS în mod normal depășește precizia măsurătorilor directe. Pentru a atinge această precizie ridicată este neapărat necesar să se respecte protocolul de culegere și prelucrare a datelor, să se realizeze scanări multiple în condiții meteo favorabile și să se asigure o coregistrare cât mai precisă. Prin urmare, cantitatea de lucru atât pe teren cât și la birou este incomparabil mai mare decât în cazul măsurătorilor directe, necesitând deasemeni competențe ridicate în prelucrarea datelor și stăpânirea posibilelor surse de erori.

Metodele de inventariere forestiere se află într-o fază de îmbunătățire constantă. Metoda TLS a demonstrat capacitatea ei de a fi mai performantă pentru măsurarea diametrului și

poziționarea arborilor în spațiu, dar mai puțin performantă pentru determinarea înălțimii în anumite situații. Însă determinarea formei fusului este posibilă în baza metodei TLS, ceea ce ar aduce la o îmbunătățire a preciziei determinării volumului și a biomasei fusului. Măsurătorile diametrului de-a lungul fusului nu sunt ușoare cu metodele clasice, și sunt și destul de puțin precise. În acest caz, metoda TLS ar aduce un set de date noi, foarte utile pentru a realiza estimări de volum mai precise.

În ultimul deceniu s-a pus tot mai mult accent asupra stocării de carbon ca mecanism de reducere a emisiilor gazelor cu efect de seră, acest lucru fiind amplificat cu ocazia semnării protocolului de la Kyoto al Convenției Cadru a Națiunilor Unite privind Schimbările Climatice (UNFCCC, COP-3: conferința a treia a părților, pe tema schimbărilor climatice, 1997). Cuantificarea cantităților de carbon stocate în pădurile din România rămâne o provocare pentru că nu au fost dezvoltate modele de biomasă, iar modelele de volum sunt depășite și nu includ o estimare a erorilor. Rapoartele de țară care trebuie întocmite trebuie în mod obligatoriu să prezinte o estimare a erorilor pentru fiecare compartiment, ceea ce presupune estimarea deviației estimărilor de biomasă a pădurilor cu măsurători reale pe teren. În acest context, metoda TLS oferă un răspuns practic și eficient. Rezultatele acestui studiu pot constitui o pre-testare extrem de utilă în eventualitatea unei campanii de măsurători care să aibă ca obiectiv estimarea biomasei arborilor pe picior prin mijloace nedestructive.

În concluzie, metoda TLS nu este încă o metodă care poate fi implementată la scară mare în practică pentru că:

(i) este dificil de implementat pe teren din cauza greutatei aparatului, a cantității de lucru necesare pentru prelucrarea datelor, a complexității procesului de prelucrare a datelor, și a restricțiilor numeroase ce decurg din condițiile meteo;

(ii) multe aspecte rămân experimentale, neoptimizate, depinzând de experiența operatorului;

**Table 3** Avantaje, dezavantaje și precauții legate de utilizarea TLS  
*Advantages, disadvantages and precautions about TLS utilization*

| AVANTAJE                   |   |
|----------------------------|---|
| i.                         | Poziționarea exactă a arborilor/Determinarea exactă a diametrului   |
| ii.                        | Măsurarea de diametre suplimentare la înălțime pe fus (măsurători nedistructive)  |
| iii.                       | Calcularea directă a volumului ramurilor și a arborilor înfurciți sau din aceeași cioată (atipici)                      |
| iv.                        | <b>Panta terenului</b> nu creează dificultăți la măsurare, ci mai dregabă poate îngreuna munca în teren                 |
| DEZAVANTAJE                |   |
| i.                         | Greutatea echipamentului (30-50 kg)   |
| ii.                        | Timp de scanare 4-5 ore pe piață pentru o scanare cu precizie ridicată  |
| iii.                       | Timpul lung de prelucrare a norului de puncte   |
| iv.                        | Restricții de utilizare în teren (meteorologice)  |
| v.                         | Posibilitatea apariției erorilor/pierderilor de date în cazul mișcării reperelor ce duc la ratarea coregistrării        |
| PRECAUȚII MĂSURĂTORI TEREN |   |
| i.                         | Cadru portabil și generator   |
| ii.                        | Minim 3 repere vizibile din fiecare stație  |
| iii.                       | Scanări complementare pentru a combate obstrucția, dacă sunt respectate unele condiții de distanță maximă între scanări |
| iv.                        | Minim 2 m distanță față de arbori sau repere  |
| v.                         | Dimensiunea optimă a piețelor de probă este de 30x30m în arboretele dese.   |

(iii) sunt necesare progrese în prelucrarea norilor de puncte pentru ca metoda să ajungă la o fază de implementare automatizată. Tabelul următor sintetizează cele mai importante aspecte legate de utilizarea TLS.

### Mulțumiri

Acest studiu a fost susținut financiar de către Autoritatea Națională pentru Cercetare și Inovare, CNCS/CCCDI – UEFISCDI prin proiectul ForBiome, PN-III-P2-2.1-PED-2016-1540.

### Bibliografie

Apostol, B., Chivulescu, S., Ciceu, A., Petrița, M., Pascu, I.-S., Apostol, E.N., Leca, S., Lorent, A., Tanase, M., Badea, O., 2018. Data collection methods for forest inventory: a comparison between an integrated conventional equipment and terrestrial laser scanning. *Ann. For.*

Res. 61(2): 189-202.  
 Astrup, R., Ducey, M.J., Granhus, A., Ritter, T., von Lüpke, N., 2014. Approaches for estimating stand-level volume using terrestrial laser scanning in a single-scan mode. *Can. J. For. Res.* 44, 666–676.  
 Cabo, C., Ordóñez, C., López-Sánchez, C. A., Armesto, J., 2018. Automatic dendrometry: Tree detection, tree height and diameter estimation using terrestrial laser scanning. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 69: 164-174.  
 Chasmer, L., Hopkinson, C., Smith, B., Treitz, P., 2006. Examining the influence of changing laser pulse repetition frequencies on conifer forest canopy returns. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72(12): 1359-1367.  
 Eysn, L., Pfeifer, N., Ressel, C., Hollaus, M., Graf, A., Morsdorf, F., 2013. A practical approach for extracting tree models in forest environments based on equirectangular projections of terrestrial laser scans. *Remote Sensing*, 5(11): 5424-5448.  
 Heinzl, J., Huber, M. O., 2017. Tree stem diameter estimation from volumetric tls image data. *Remote Sensing*, 9(6): 614.  
 Hilker, T., Coops, N. C., Culvenor, D. S., Newnham, G., Wulder, M. A., Bater, C. W., Siggins, A., 2012. A simple technique for co-registration of terrestrial LiDAR observations for forestry applications. *Remote sensing letters*, 3(3): 239-247.

- Hopkinson, C., Chasmer, L., Young-Pow, C., Treitz, P., 2004. Assessing forest metrics with a ground-based scanning lidar. *Canadian Journal of Forest Research*, 34(3): 573-583.
- Hosoi, F., Omasa, K., 2006. Voxel-based 3-D modeling of individual trees for estimating leaf area density using high-resolution portable scanning lidar. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 44(12):3610-3618.
- Hyypä, J., Jaakkola, A., Hyypä, H., Kaartinen, H., Kukko, A., Holopainen, M., Zhu, L., Vastaranta, M., Kaasalainen, S., Krooks, A., Litkey, P., Lyytikäinen-Saarenmaa, P., Matikainen, L., Rönholm, P., Chen, R., Chen, Y., Kivilahti, A., Kosonen, I., 2009. Map updating and change detection using vehicle-based laser scanning. In: *Proc. Urban Remote Sensing Joint Event*, Shanghai, 20–22, May. 6 p.
- Holopainen, M., Kankare, V., Vastaranta, M., Liang, X., Lin, Y., Vaaja, M., ... Alho, P., 2013. Tree mapping using airborne, terrestrial and mobile laser scanning – A case study in a heterogeneous urban forest. *Urban Forestry & Urban Greening*, 12(4): 546–553. <https://doi.org/10.1016/J.UFUG.2013.06.002>
- Kaasalainen S., Hyypä J., Krooks A., Karjalainen M., Lyytikäinen-Saarenmaa P., Holopainen M., Jaakkola A., 2010. Comparison of terrestrial laser scanner and Synthetic aperture radar data in the study of forest defoliation *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (Part 7A)*:82-87
- Kankare, V., Holopainen, M., Vastaranta, M., Puttonen, E., Yu, X., Hyypä, J., ... & Alho, P., 2013. Individual tree biomass estimation using terrestrial laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 75:64-75.
- Kankare, V., 2015. The prediction of single-tree biomass, logging recoveries and quality attributes with laser scanning techniques. *Dissertationes Forestales (Vol. 2015)*. <https://doi.org/10.14214/df.195>
- Liang, X., Kankare, V., Hyypä, J., Wang, Y., Kukko, A., Haggrén, H., ... Vastaranta, M., 2016. Terrestrial laser scanning in forest inventories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115: 63–77. <https://doi.org/10.1016/J.ISPRSJPRS.2016.01.006>
- Liang, X., Litkey, P., Hyypä, J., Kaartinen, H., Vastaranta, M., & Holopainen, M., 2012. Automatic Stem Mapping Using Single-Scan Terrestrial Laser Scanning. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(2): 661–670. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2161613>
- Maas, H.G., Bienert, A., Scheller, S., Keane, E., 2008. Automatic forest inventory parameter determination from terrestrial laser scanner data. *Int. J. Remote Sens.*, 29:1579–1593.
- Moorthy, J.R., Miller, B., Hu, J., Chen, Q. Li, 2008. Retrieving crown leaf area index from an individual tree using ground-based lidar data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 34 (3):320-332.
- Olofsson, K., Holmgren, J., Olsson, H., 2014. Tree stem and height measurements using terrestrial laser scanning and the ransac algorithm. *Remote Sens.*, 6:4323–4344.
- OM nr. 1323/2015 - privind aprobarea metodelor dendrometrice pentru evaluarea volumului de lemn destinat valorificării și valorile necesare calculului volumului de lemn destinat valorificării
- Pfeifer, N., & Winterhalder, D., 2004. Modelling of tree cross sections from terrestrial laser scanning data with free-form curves. *International Archives of Photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, 36(8), W2.
- Raumonen, P., Kaasalainen, S., Kaasalainen, M., Kaartinen, H., 2011. Approximation of volume and branch size distribution of trees from laser scanner data. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38 (Part 5/W12), 6p
- UNFCCC, COP-3: conferința a treia a părților, pe tema schimbărilor climatice, 1997
- Wilkes, P., Lau, A., Disney, M., Calders, K., Burt, A., de Tanago, J. G., ... Herold, M., 2017. Data acquisition considerations for terrestrial laser scanning of forest plots. *Remote Sensing of Environment*, 196:140-153.
- Vastaranta, M., Melkas, T., Holopainen, M., Kaartinen, H., Hyypä, J., & Hyypä, H., 2009. Laser-based field measurements in tree-level forest data acquisition. *Photogramm. J. Finl*, 21: 51-61.
- Xia, S., Wang, C., Pan, F., Xi, X., Zeng, H., Liu, H., 2015. Detecting stems in dense and homogeneous forest using single-scan TLS. *Forests*, 6(11):3923-3945.