Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

Uso do laser scanner terrestre na estimativa de parâmetros biométricos em
povoamentos florestais

Gustavo José Ferreira de Almeida

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências, Programa: Recursos Florestais.
Opção em: Silvicultura e Manejo Florestal

Piracicaba
2017

Gustavo José Ferreira de Almeida
Engenheiro Florestal

**Uso do laser scanner terrestre na estimativa de parâmetros biométricos em povoamentos
florestais**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **LUIZ CARLOS ESTRAVIZ RODRIGUEZ**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências, Programa: Recursos Florestais.
Opção em: Silvicultura e Manejo Florestal

Piracicaba
2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Almeida, Gustavo José Ferreira de

Uso do laser scanner terrestre na estimativa de parâmetros biométricos em povoamentos florestais / Gustavo José Ferreira de Almeida. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2017.

50 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. TLS 2. Laser 3. Varredura laser terrestre 4. Biometria florestal I.
Título

A Marcelo Almeida e Flora Baraldi,

dedico.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, José Rubens e Dulce, pelo constante e irrestrito apoio e por serem a inspiração que me sustenta e fez chegar até aqui.

Aos meus irmãos, André e Marcelo, pela parceria.

Aos tios Homero, Neto e José Carlos, à tia Maria das Graças e a Vera Lúcia Rodrigues, por tornarem essa família única.

Ao Prof. Dr. Luiz Carlos Estraviz Rodriguez, pela orientação e contribuição técnica imprescindível.

Aos pesquisadores Grégoire Vincent (AMAP) e Tiago do Conto (ESALQ/USP) pelo apoio e contribuição fundamentais, sem os quais este trabalho não teria sido realizado.

A Rildo Moreira e Moreira e toda a equipe da Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga pelo apoio nos trabalhos de campo (nesta etapa e durante o curso de graduação).

Aos colegas do grupo de pesquisa GET-LiDAR (ESALQ-USP) Alexandre Camargo, Luísa Gurjão, Daniel Papa, Thaís Abib, Gabriel Prata, Julianne Oliveira, Danitiele Laranja e André Gracioso pelas conversas, contribuições e risadas.

Aos colegas do CMQ (Centro de Métodos Quantitativos – ESALQ/USP) pela amizade e conversas enriquecedoras.

Aos amigos Cauê Gomes e Paulo Lattari por dividirem o mesmo teto com companheirismo e muita paciência, e aos amigos da República Atecubanos por toda a amizade.

Ao Abajur por trazer paz e alegria ao lar durante o processo.

A CAPES e IPEF pela concessão de bolsas de estudo e pesquisa.

“E tudo foi bem assim, porque tinha de ser, já que assim foi.”

Guimarães Rosa

SUMÁRIO

RESUMO.....	7
ABSTRACT	8
LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE TABELAS	10
1. INTRODUÇÃO.....	11
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3. MATERIAL E MÉTODOS	21
3.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	21
3.2. MEDIÇÃO DAS ÁREAS E CUBAGEM	21
3.3. VARREDURA LASER	23
3.4. PROCESSAMENTO DAS NUVENS E EXTRAÇÃO DE MÉTRICAS	25
3.5. ANÁLISE ESTATÍSTICA	29
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4.1. MEDIÇÕES EM CAMPO E CUBAGEM.....	31
4.2. PROCESSAMENTO DE DADOS TLS	31
4.3. CONSIDERAÇÕES.....	42
5. CONCLUSÃO.....	43
REFERÊNCIAS.....	45

RESUMO

Uso do laser scanner terrestre na estimativa de parâmetros biométricos em povoamentos florestais

A quantificação de recursos florestais é usada para fins diversos nas ciências naturais, e depende da obtenção de dados de campo de forma precisa e rápida, e o inventário florestal tem se valido principalmente de trabalho humano manual para este fim. A tecnologia LiDAR, baseada em sistemas a laser, permite a coleta desses dados por meio da representação tridimensional do ambiente e a geração de informações espacialmente precisas dos objetos que o compõe. O sistema de varredura laser terrestre (*terrestrial laser scanning* – TLS) aplica essa tecnologia sob abordagem terrestre, e assim pode ser usada na representação 3D de florestas e ambientes naturais. Devido a crescente número de estudos nesse tópico atualmente o sistema TLS é capaz de fornecer métricas florestais básicas com elevada exatidão, como densidade de plantio e diâmetro à altura do peito, além de informações não obtidas pelo inventário florestal padrão, como estimativa da biomassa e índice de área foliar, entre outros. Este trabalho tem por objetivo a avaliação da capacidade do sistema TLS em fornecer com exatidão métricas de árvores individuais selecionadas em dois povoamentos florestais localizados no sudeste do Brasil. Árvores de *Eucalyptus* sp. (n = 6) e *Pinus elliottii* var. *elliottii* (n = 5) foram submetidas à varredura e os valores obtidos pelo mapeamento 3D foram comparados com dados medidos em campo manualmente. Os resultados encontrados mostram que o algoritmo empregado na filtragem dos troncos foi eficiente no isolamento dos fustes de árvores individuais até a altura total das árvores amostradas, enquanto que o algoritmo para modelagem do tronco filtrado foi capaz de fornecer medidas de diâmetro até 50% da altura total das amostras. A exatidão das medidas de DAP pelos dados TLS foi de 0,91 cm e 2,77 cm (REQM) para *Eucalyptus* e *Pinus*, respectivamente. Os diâmetros ao longo do fuste tiveram mais exatidão no *Eucalyptus* (REQM = 2,75 cm e $r = 0,77$) do que no *Pinus* (REQM = 3,62 cm e $r = 0,86$), resultados condizentes com os encontrados em literatura. A exatidão da estimativa dos diâmetros diminuiu ao longo do fuste. O autor sugere que a influência de vento forte no momento da varredura pode ter interferido na qualidade das nuvens de pontos em relação a ruídos e na exatidão dos modelos de obtenção de diâmetros. A partir destes resultados conclui-se que, para as características ambientais e parâmetros de varreduras apresentados, o sistema TLS foi capaz de fornecer dados com exatidão aceitável, e mais estudos devem ser conduzidos buscando o entendimento e mitigação de efeitos que podem dificultar a obtenção de dados precisos nos estratos superiores do dossel florestal.

Palavras-chave: TLS; Laser; Varredura laser terrestre; Biometria florestal

ABSTRACT

Use of terrestrial laser scanning on biometric parameters estimations of forest plantations

Forest resources assessment is used for diverse purposes on natural sciences, and relies on field data acquisition in fast and precise ways, and forest inventory has been relying mainly on manual human labor for that. LiDAR technology, which is based on a laser system, allows for these data acquisition through 3D representation of surroundings and the generation of especially precise information about the objects within. Terrestrial laser scanning – TLS – applies this technology in a land approach, thus it can be used on the 3D representation of forests and natural scenes. Due to increasing number of studies on this subject nowadays TLS system is capable of giving basic forest metrics with high precision, as for plant density and diameter at breast height, besides information not obtained by standard inventory procedures, as biomass estimation and leaf area index, among others. This work aims the assessment of TLS capability on giving precise metrics of individual trees located at two forest stands in southeastern Brazil. Trees of *Eucalyptus* sp. ($n = 6$) and *Pinus elliottii* var. *elliottii* ($n = 5$) were scanned and the numbers obtained by 3D mapping were compared to manually measured field data. The results found show that the algorithms used on trunk filtration were efficient on individual trees stem isolation until total height of measured trees, while the trunk modelling algorithm was capable of giving diameters until 50% of samples total height. The precision of DBH measurements by TLS data was 0,91 cm and 2,77 cm (RMSE) for *Eucalyptus* and *Pinus*, respectively. Diameters along the stem were more precisely estimated for *Eucalyptus* trees (RMSE = 2,75 cm and $r = 0,77$) than for *Pinus* trees (RMSE = 3,62 cm and $r = 0,86$), results consistent with literature. The precision of diameters estimation diminished along the stem. The author suggests that the influence of intense wind by the time of scanning can have interfered on cloud point quality in the terms of noises and thus on the precision of diameter estimation modelling. From these results one can conclude that, considering the environmental aspects and scanning parameters presented, TLS system was capable on giving data with acceptable precision, and more studies must be carried searching for understanding and mitigation of effects that can difficult precise data acquisition on upper forest strata.

Keywords: TLS; Laser; Terrestrial laser scanning; Forest biometry

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS EXPERIMENTAIS. À ESQUERDA O MUNICÍPIO DE ITATINGA (SP) NO CONTEXTO REGIONAL; À DIREITA, AS ÁREAS EXPERIMENTAIS DENTRO DA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL. (FONTE: GOOGLE EARTH. ACESSO EM 01/06/2016).....	21
FIGURA 2. APARELHO TLS RIEGL VZ-400, UTILIZADO NA GERAÇÃO DE DADOS LIDAR NESTE TRABALHO.	23
FIGURA 3. LAYOUT DAS ÁREAS DE MEDIÇÃO EM CAMPO.	24
FIGURA 4. EXEMPLO DE ALVO UTILIZADO PARA CORREGISTRO DAS NUVENS (ESQ.). O OBJETO É COMPOSTO DE MATERIAL REFLETIVO E PODE SER LOCALIZADO COM FACILIDADE DURANTE O PROCESSAMENTO INICIAL DAS NUVENS. À DIREITA A IMAGEM MOSTRA UM DOS ALVOS FIXADOS AO NÍVEL DO SOLO.....	26
FIGURA 5. EXEMPLO DE NUVEM DE ÁRVORE INDIVIDUAL DE <i>PINUS</i> USADA PARA EXTRAÇÃO DE MÉTRICAS.	27
FIGURA 6. REPRESENTAÇÃO DA APLICAÇÃO DO ALGORITMO DE RANSAC NO AJUSTE DE CIRCUNFERÊNCIAS. AS ESFERAS AZUIS SÃO OS PONTOS (X, Y) CONSIDERADAS PARA AJUSTE DO MODELO DE CÍRCULO. O CÍRCULO EM VERMELHO REPRESENTA A AMPLITUDE DE VARIAÇÃO DA AMOSTRA E O CÍRCULO PRETO É O RESULTADO DO AJUSTE DO MODELO.....	28
FIGURA 7. ESQUEMA GRÁFICO QUE REPRESENTA A “FATIA” DE NUVEM UTILIZADA PELO ALGORITMO DE RANSAC PARA GERAÇÃO DO ARQUIVO RASTER E CONSEQUENTE OBTENÇÃO DA CIRCUNFERÊNCIA MODELADA. A ESPESSURA DA “FATIA” FOI DE 0,30 M, E A ALTURA (Z) CONSIDERADA PARA LOCALIZAÇÃO DA CIRCUNFERÊNCIA FOI O VALOR DE Z MÉDIO ENTRE O Z MÁXIMO E O Z MÍNIMO (TOPO E BASE DA “FATIA”).	29
FIGURA 8. RESÍDUOS PERCENTUAIS DAS ALTURAS ALCANÇADAS PELAS ETAPAS DE FILTRAÇÃO E AJUSTE DE CIRCUNFERÊNCIAS.....	32
FIGURA 9. EXEMPLOS DE FUSTES “FANTASMAS” DE <i>EUCALYPTUS</i> SP. OCASIONADOS PELA ALTA INCIDÊNCIA DE VENTOS NO MOMENTO DA VARREDURA.	33
FIGURA 10. RECORTE TRANSVERSAL DA NUVEM DA ÁRVORE 01 DO <i>EUCALYPTUS</i> . À ESQUERDA, CORTE FEITO ENTRE AS ALTURAS DE 0,89 E 1,78 M; À DIREITA, CORTE ENTRE AS ALTURAS DE 6,23 E 7,12 M. PODE-SE OBSERVAR A PERDA DE PADRÃO CIRCULAR NOS PONTOS NA FAIXA MAIS ALTA.....	34
FIGURA 11. DIÂMETROS OBSERVADO E ESTIMADO PARA AS DUAS ESPÉCIES.	36
FIGURA 12. DISTRIBUIÇÃO DO RESÍDUO PERCENTUAL DOS DIÂMETROS EM RELAÇÃO À ALTURA (HI) EM QUE O DIÂMETRO FOI ESTIMADO.....	37
FIGURA 13. BOXPLOT DOS RESÍDUOS DOS DIÂMETROS (M) EM RELAÇÃO A CLASSES DE DIÂMETRO.....	38
FIGURA 14. BOXPLOT DOS RESÍDUOS DOS DIÂMETROS EM RELAÇÃO A CLASSES DE ALTURA ABSOLUTA.	39

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: INFORMAÇÕES DE PLANTIO DAS ÁREAS EXPERIMENTAIS EM QUE FORAM INSTALADAS AS PARCELAS PARA ESCANEAMENTO LASER.....	21
TABELA 2: CARACTERÍSTICAS DO EQUIPAMENTO LASER SCANNER RIEGL VZ-400 UTILIZADO NA OBTENÇÃO DOS DADOS.....	24
TABELA 3. VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS OBTIDAS NAS DUAS PARCELAS.....	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
TABELA 4. RESULTADOS DO AJUSTE DE MODELO DE RELAÇÃO HIPSOMÉTRICA PARA AS DUAS ESPÉCIES.	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
TABELA 5. DEFINIÇÃO DOS LIMITES INFERIOR E SUPERIOR DAS CLASSES DE DIÂMETRO EM QUE SE BASEOU A SELEÇÃO DE ÁRVORES PARA CUBAGEM RIGOROSA.....	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
TABELA 6. PERCENTUAL DA ALTURA DAS ÁRVORES ATÉ A QUAL OS ALGORITMOS DE FILTRAGEM E AJUSTE DE CIRCUNFERÊNCIAS FORAM CAPAZES DE GERAR VALORES. “H FILTRO / H TOTAL” REPRESENTA O QUANTO, EM RELAÇÃO À ALTURA TOTAL, A TRANSFORMAÇÃO DE HOUGH FOI CAPAZ DE FILTRAR E ISOLAR O FUSTE; VALORES ACIMA DE 100% INDICAM QUE O ALGORITMO ENCONTROU PADRÕES QUE CONSIDEROU “FUSTE” ACIMA DA ALTURA TOTAL CONSIDERADA PELA TOMADA EM CAMPO. “H AC / H TOTAL” INDICA A ALTURA MÁXIMA EM QUE CÍRCULOS FORAM MODELADOS À NUVEM DE PONTOS JÁ FILTRADA.	32
TABELA 7. DADOS DA COMPARAÇÃO ENTRE VALORES DE DAP OBTIDOS EM CAMPO (DAP CAMPO) E VIA PROCESSAMENTO DAS NUVENS DE PONTOS (DAP TLS) E ANÁLISE ESTATÍSTICA (VIÉS E REQM) DOS RESULTADOS.	35
TABELA 8. RESUMO DA COMPARAÇÃO ENTRE DIÂMETROS OBSERVADOS E ESTIMADOS. O VIÉS DAS ESTIMATIVAS FOI NEGATIVO PARA AMBAS AS ESPÉCIES, SUGERINDO SUPERESTIMATIVAS DOS VALORES GERADOS PELO AJUSTE DE CIRCUNFERÊNCIAS NAS NUVENS DE PONTOS.	36
TABELA 9. VALORES DE VIÉS (M³), REQM (M³) E CORRELAÇÃO DE PEARSON PARA OS VOLUMES DAS SEÇÕES.	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
TABELA 10. RESÍDUO ENTRE VOLUME ESTIMADO E OBSERVADO DE CADA ÁRVORE. A ALTURA CONSIDERADA PARA CADA INDIVÍDUO FOI A MÁXIMA ATINGIDA PELO AJUSTE DE CIRCUNFERÊNCIAS (H AC).....	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.

1. INTRODUÇÃO

O planejamento florestal é parte fundamental do manejo de florestas nativas ou plantadas. Ao tratar de recursos naturais, o manejo florestal demanda criterioso planejamento uma vez que este fornecerá a base de gerenciamento para que o negócio possa se sustentar ao longo do tempo.

A quantificação e qualificação dos produtos florestais, por meio do Inventário Florestal e como parte deste processo de planejamento, são essenciais na medida em que alimentam o manejador com informações que embasem suas decisões. Mensurações em campo fornecem dados biométricos dos povoamentos florestais, em escalas que partem do indivíduo, sua agregação espacial como unidades amostrais (parcelas) até a escala de talhões e plantios extensos, considerando o exemplo das florestas plantadas. Esses dados de campo são utilizados na construção de modelos que permitam tanto quantificar e qualificar o estoque presente dos povoamentos quanto predizer a produção futura destas áreas.

Neste contexto, a tecnologia TLS (*terrestrial laser scanning*), ou *laser scanner* terrestre se apresenta como ferramenta para o mapeamento tridimensional de ambientes, a partir do qual podem ser extraídas informações visando obtenção de parâmetros biométricos da população.

O processo no qual o TLS está inserido é denominado LiDAR – *Light Detection and Ranging*, que consiste na varredura de objetos realizada por meio da emissão de pulsos *laser*. Os pulsos emitidos fazem a varredura dos objetos sólidos que estão em seu alcance, retornando ao receptor que então calcula a distância entre emissor e objeto, gerando uma nuvem de pontos tridimensional (x , y e z) que reflete a posição dos objetos detectados. A configuração do equipamento, bem como sua disposição geográfica (distância e posição em relação aos objetos alvo), influenciam diretamente na qualidade dos dados obtidos e na confiabilidade da informação gerada (DUCEY; ASTRUP, 2013).

A partir da geração da nuvem bruta de pontos, faz-se necessária a identificação e eliminação de ruídos – galhos, folhas, arbustos ou outro objeto que não seja alvo do mapeamento. Esta etapa é importante pois estes ruídos aumentam a área sombreada – não mapeada pela nuvem de pontos – e, conseqüentemente, a necessidade de inferências sobre elas, aumentando a possibilidade de erro nestas estimativas (GARCÍA et al., 2015). Para a detecção dos objetos necessários – e a

consequente eliminação de ruídos – são utilizados algoritmos que propõe a reconstrução dos objetos a partir dos dados retornados. Muitos trabalhos se propuseram, e ainda propõe, a este objetivo, esforço que é justificado pela constante necessidade de aprimoramento dos métodos de processamento dos arquivos de dados, que são bastante pesados e complexos.

A obtenção de variáveis dendrométricas individuais (biometria das árvores) tem tido bastante destaque nos trabalhos envolvendo TLS. Como variável de interesse destaca-se o diâmetro à altura do peito (DAP), cuja obtenção tem sido realizada com exatidão mais que satisfatória (LICHTI; PFEIFER; MAAS, 2008)(SRINIVASAN et al., 2014). Outra variável importante no inventário florestal, por compor com o DAP o par de variáveis mais utilizados na construção de modelos volumétricos, é a altura, que tem também apresentado exatidão satisfatória embora decrescente no sentido ascendente na árvore. Ainda assim, ressalvas são feitas no uso dessas informações a partir de uma certa altura das árvores (MENGESHA; HAWKINS; NIEUWENHUIS, 2015). Destacam-se ainda, em trabalhos envolvendo TLS, as estimativas de índice de área foliar (IAF) e biomassa (BÉLAND et al., 2011; HAUGLIN et al., 2013; OLSOY et al., 2014; SRINIVASAN et al., 2014). Outro aspecto importante para o manejo florestal é a estimativa do volume das árvores individuais e sua posterior extrapolação para o restante do povoamento, sobre o qual diversos estudos têm sido realizados (OTHMANI et al., 2013; SRINIVASAN et al., 2014). Dentre as formas de estimativa do volume individual da árvore destaca-se o uso de seções do tronco como variável independente em modelos volumétricos ou funções de afilamento. Estudos tem focado nesta técnica enquanto se mostra eficiente na estimativa dos volumes individuais (GARCÍA et al., 2011; HAUGLIN et al., 2013).

O objetivo geral deste trabalho foi estimar variáveis dendrométricas em indivíduos arbóreos a partir de dados de levantamento com laser scanner terrestre.

Os objetivos específicos são:

- i) Avaliar a exatidão das estimativas de variáveis dendrométricas a partir de varredura com laser scanner terrestre
- ii) Comparar as estimativas entre diferentes tipos de povoamentos florestais.

As hipóteses estabelecidas no trabalho são:

H_0 : as estimativas das variáveis dendrométricas obtidas a partir da varredura com laser scanner terrestre apresentam elevada exatidão em relação ao método considerado tradicional.

H_1 : a exatidão das estimativas das variáveis dendrométricas obtidas a partir da varredura com laser scanner terrestre é baixa em comparação aos métodos considerados tradicionais de mensuração florestal.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

LiDAR, da sigla em inglês Light Detection and Ranging, é uma tecnologia de varredura de ambientes e objetos baseada em mecanismo a *laser*, sigla em inglês que significa *light amplification by stimulated emission of radiation*. O mecanismo emprega energia no estímulo de átomos que, ao retornarem ao seu estado de equilíbrio original, gera um fóton. Este fóton atinge outros átomos que, energizados, tendem a voltar igualmente ao seu equilíbrio original, liberando também um fóton, como o primeiro átomo. Desta forma uma reação em cadeia ocorre pela liberação sucessiva de fótons que, direcionados para extremidades do tubo energizado, constituem um feixe concentrado de fótons de radiação luminosa. O feixe laser emitido, ao atingir objetos sólidos, é refletido pela superfície destes e tem seus atributos, como intensidade de retorno, distância e ângulo, medidos por receptor calibrado. Assim, cada retorno ao sensor é considerado um ponto laser, e desta forma a tecnologia permite a representação tridimensional do meio físico por meio da criação de conjunto de pontos laser – chamada de *nuvem de pontos* – que refletem a posição de objetos no espaço (PETRIE; TOTH, 2009)

A aplicação da tecnologia LiDAR tem como vantagens alta densidade amostral, capacidade de penetração em espaços reduzidos (vegetação, por exemplo), sensibilidade a pequenas variações na superfície e geração de grande quantidade de informação em curto intervalo de tempo (LIANG et al., 2016)

Os sistemas a *laser* atualmente utilizados valem-se de dois mecanismos distintos de cálculo de distância. O mecanismo *time-of-flight* (TOF) calcula o tempo de retorno do pulso laser ao emissor com altíssima exatidão e, baseando-se na velocidade da luz, calcula a distância do emissor ao objeto. O mecanismo *phase shift*, por sua vez, emite um feixe óptico contínuo e detecta variações na amplitude de frequência do feixe para calcular a distância.

Terrestrial laser scanning – TLS – ou varredura laser terrestre é um instrumento baseado na tecnologia LiDAR que a utiliza ao nível do solo para varredura de ambientes terrestres. É composto basicamente por emissor laser acoplado a dois eixos, vertical e horizontal, em que o feixe óptico é refletido por espelhos que realizam movimento rotatório de alta velocidade em torno do eixo horizontal, distribuindo tais feixes em abertura angular de, geralmente, 170°. Tal movimento realiza a varredura no sentido vertical. Ao mesmo tempo o equipamento

faz movimento circular giratório (em torno do eixo vertical) em baixa velocidade, e a varredura é realizada em abertura total, de 360°. A composição de ambos movimentos permite que o ambiente seja escaneado de maneira que sua representação tenha a forma geométrica de uma seção de cilindro. Para a varredura da parte superior do ambiente (ou a “tampa” deste suposto cilindro) os equipamentos disponíveis valem-se de duas estratégias distintas: aqueles que já realizam o movimento rotacional em torno do eixo horizontal em abertura angular maior (330°) ou os que necessitam de reconfiguração manual da estação de varredura, ou seja, após a primeira visada o equipamento é tombado em 90° para a realização da segunda varredura, e a parte superior do ambiente é escaneada.

Os mecanismos de funcionamento dos sistemas TLS permitem que sejam gerados milhões de pontos em curto espaço de tempo e com alta resolução espacial. No mercado há atualmente disponíveis desde equipamentos mais simples que emitem 2.000 pontos/s (a exemplo do equipamento VELODYNE®) até os mais robustos, emitindo 122.000 pontos/s (FARO®, RIEGL®), e ambos podendo ter elevada resolução angular. Para objetos próximos ao emissor (p. ex. 25 m) isso pode resultar em superfícies recobertas por milhares de pontos com exatidão no nível de mm, e objetos distantes (100 a 300 m) podem ser identificados com facilidade para levantamentos mais generalistas (EITEL; VIERLING; MAGNEY, 2013).

A quantidade de pontos gerada pelo sistema TLS pode ser, em alguns casos, excessiva, sob a ótica da exatidão das informações que são geradas pela interpretação das nuvens, como no caso da extração de métricas de uso na área florestal. Estimativas satisfatórias têm sido encontradas com densidade de pontos inferior à capacidade de fornecimento dos equipamentos disponíveis, despertando o interesse de alguns pesquisadores em verificar qual a quantidade mínima de pontos necessária para que informações de relevância científica sejam geradas (EITEL; VIERLING; MAGNEY, 2013; KELBE, 2015). Desta forma, equipamentos menos robustos, mais simples, leves e baratos podem ser desenvolvidos para atender a nichos específicos de utilização da tecnologia LiDAR.

O conjunto de dados fornecidos pelo hardware TLS é composto basicamente por uma matriz contendo as informações de cada observação (ponto laser) no formato (x,y,z), e esta é a forma básica e padronizada de operação de nuvens TLS. Cada ponto, portanto, possui primordialmente dados de localização no espaço

(x,y,z), mas pode também trazer informações complementares, como tipo do retorno de acordo com a intensidade (primeiro, segundo, ..., último retorno). Nesse sentido, novas tecnologias vêm sendo aplicadas a sistemas TLS com sucesso, como sensores de múltiplos comprimentos de onda e hiperespectrais, que permitem a segregação de objetos como galhos, casca, tronco, além de serem capazes de fornecer informações sobre aspectos bioquímicos e biofísicos do ambiente (DANSON et al., 2014; GAULTON et al., 2013).

A coleta de dados TLS depende da chamada geometria da varredura, isto é, a forma com que o dispositivo laser é posicionado em campo. No modo varredura simples (*single-scan mode*) os dados são obtidos a partir de localização fixa e única do equipamento, que assume posição central na nuvem de pontos. No modo varredura múltipla, o equipamento é posicionado em mais de um local de forma que haja sobreposição das nuvens geradas por cada posição, e esta sobreposição permite que posteriormente as diferentes nuvens sejam mescladas em uma única, com o auxílio de alvos visíveis e identificáveis que permitem o correto registro de cada conjunto de pontos (LICHTI; SKALLOUD, 2010). A varredura simples permite incursões rápidas no ambiente, já que cada unidade amostral será composta por uma única varredura. Como desvantagem, a alta taxa de oclusão de objetos que são “sombreados” pelos objetos mais próximos ao emissor (folhas, galhos, outros troncos, sub-bosque, etc) (LOVELL et al., 2011).

A varredura múltipla permite o total recobrimento da superfície dos objetos que compõe a unidade amostral (principalmente em florestas mais antigas ou densas), uma vez que as diversas posições do equipamento, dentro e fora da área experimental, resultam em recobrimento de partes sombreadas pelas outras varreduras. No entanto é mais trabalhoso e custoso devido à necessidade de deslocamento e configuração do equipamento em vários pontos para cada unidade amostral, além de necessitar de mais tempo de processamento dos dados. As diferenças de resultados entre cada método foram avaliadas por diversos autores e verificou-se que a exatidão de cada método depende inicialmente da densidade de plantas do local (MURPHY; ACUNA; DUMBRELL, 2010) e da distância do equipamento ao objeto (ASTRUP et al., 2014; LIANG et al., 2012a; OLOFSSON; HOLMGREN; OLSSON, 2014; MARTINS NETO et al., 2013).

Desde os primeiros estudos com TLS na área florestal as métricas básicas que compõe os trabalhos de inventário florestal são estudadas, como contagem e posição das árvores nas parcelas e a obtenção do *DAP*, ou diâmetro à altura do peito (BIENERT et al., 2006; LICHTI; PFEIFER; MAAS, 2008). A detecção das árvores da parcela ainda é tema de estudos recentes por ser de fundamental importância para inventários florestais e por apresentar certa dificuldade em florestas (OLOFSSON; HOLMGREN; OLSSON, 2014). A densidade de plantas no povoamento implica diretamente na capacidade dos sistemas computacionais empregados em detectar os fustes da área (LIANG et al., 2012a; LIANG; HYYPPÄ, 2013; BROLLY; KIRÁLY, 2009). Da mesma forma, o *DAP* tem sido estudado em povoamentos com diferentes características e sob diferentes configurações de varredura (KANKARE et al., 2015; LINDBERG et al., 2012; YAO et al., 2011). Outros parâmetros dendrométricos têm sido estudados via sistemas TLS, como o afilamento do tronco, ou *taper*, que representa o decréscimo do diâmetro ao longo do fuste. A partir desses valores pode-se estudar a floresta em compartimentos, isto é, as seções de tronco são divididas de acordo com classes de diâmetro de forma que cada árvore terá toras pertencentes a cada intervalo pré-estabelecido. A importância dessa compartimentalização - chamada também de sortimento florestal - está na possibilidade de otimização dos produtos oferecidos pelo povoamento florestal: variados setores da indústria podem dedicar-se a extrair da floresta os produtos que mais lhe forem economicamente coerentes, reduzindo perdas potenciais devido a estratégias inadequadas de manejo (CAMPOS; LEITE, 2009). Assim, dado determinado cenário de médias de parâmetros populacionais (altura, *DAP*, área basal, etc.), as toras oriundas das primeiras seções da árvore, de madeira mais nobre, podem ser dedicadas à indústria da madeira serrada; classes de diâmetro intermediárias serviriam à indústria de celulose ou construção civil e os diâmetros menores que certo valor indicariam uso para indústria energética.

A chamada função de afilamento é calculada pela obtenção dos diâmetros ao longo do eixo principal da árvore (altura) em intervalos regulares. Os métodos tradicionais empregados no inventário florestal são destrutivos: a árvore é abatida para medição direta de altura e diâmetro, técnica conhecida como cubagem (PRODAN, 1997). O potencial do TLS em estimar esses valores - portanto, como método não-destrutivo - e retornar uma função de afilamento foi abordado por

alguns autores, que apontaram a capacidade da técnica em estimar diâmetros na porção superior do fuste como atual desafio da área (LIANG et al., 2014).

O volume do tronco tem evidente importância para o manejo florestal e sua obtenção é o objetivo principal dos inventários florestais em plantios comerciais (CAMPOS; LEITE, 2009), que geralmente recorrem a métodos destrutivos (cubagem) para a obtenção de parâmetros para equações de estimativa de volume ou funções de afilamento. A maneira com que o TLS pode contribuir para a estimativa de volume segue estas mesmas vertentes: a estimativa de diâmetros ao longo do fuste e posterior aplicação das equações de volume de seções do tronco ou a modelagem do tronco e obtenção do volume do sólido resultante. BUCK, 2016, considerou métodos tradicionais de cálculo de volume de toretes (Smalian, Huber e Newton) a partir de diâmetros estimados por TLS e os comparou com modelagem tridimensional do tronco e cubagem via abate. Seus dados apontam que a representação tridimensional do tronco via modelagem é menor que os valores obtidos pelos outros métodos, e o autor sugere que a modelagem se aproxima do valor real do volume obtido pelo método do xilômetro.

Autores têm estudado outras variáveis e parâmetros que possam ser extraídos pelo sistema TLS, alguns desses fatores com maior quantidade de abordagens e outros ainda em estudos iniciais e exploratórios, como biomassa de tronco, galhos e folhas (CALDERS et al., 2015; KANKARE et al., 2013; NEWNHAM et al., 2015; YU et al., 2013), índice de área foliar (JUPP et al., 2009; YANG; DONG, 2013; ZHENG; MOSKAL, 2012), tamanho de clareiras (DANSON et al., 2007; ZHAO et al., 2012), radiação do dossel (VAN LEEUWEN et al., 2013), estrutura do povoamento e arquitetura da copa (BAYER; SEIFERT; PRETZSCH, 2013; MOORTHY et al., 2011), mudanças ecológicas em séries temporais ((LIANG et al., 2012; MENGESHA; HAWKINS; NIEUWENHUIS, 2015) e regeneração de florestas (BROLLY; KIRÁLY; CZIMBER, 2013).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Caracterização da área de estudo

O estudo foi conduzido em áreas experimentais localizadas na Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga, em Itatinga (SP). A região tem altitude média de 714 m e está sob regime climático definido como Cfa (ALVARES, 2013), com precipitação total anual de 1.319 mm e temperaturas médias anuais de 19,4°C (Figura 1).

Figura 1. Localização das áreas experimentais. À esquerda o município de Itatinga (SP) no contexto regional; à direita, as áreas experimentais dentro da Estação Experimental. (Fonte: Google Earth. Acesso em 01/06/2016)

Foram selecionadas duas áreas com características distintas de espécie e idade para delimitação das áreas experimentais (Tabela 1), visando avaliar a resposta de cada contexto em relação aos parâmetros da varredura.

Tabela 1: informações de plantio das áreas experimentais em que foram instaladas as áreas para varredura laser.

Parcela	Idade (anos)	Espaçamento (m)	Densidade plantio (árv/ha)	Observação	Densidade atual (árv/há)
<i>Eucalyptus sp.</i>	7	3,0 x 2,0	1.667	-	-
<i>Pinus elliottii</i> var <i>elliottii</i>	12	4,0 x 1,5	1.667	Desbaste 40%	667

3.2. Medição das áreas e cubagem

Em cada área experimental foi delimitada área circular com raio de 11,28 m, e seu centro foi definido por triangulação após a delimitação de área quadrada de lado igual a 30 m (Figura 3). As árvores limite da área circular foram definidas como

aquelas em que pelo menos metade da seção transversal à altura do peito (1,30 m) estava dentro da área delimitada de 11,28 m de raio.

Dentro da área foram medidos os DAP's de todos os indivíduos com o equipamento SUTA em dois sentidos: no sentido do alinhamento de plantio e outra medida perpendicular ao alinhamento, e considerou-se como DAP a média destas duas medidas.

A altura das árvores das duas linhas centrais da área e das quatro árvores dominantes (maiores DAP's) foi estimada pelo uso do aparelho SUUNTO®. Foram também coletadas informações qualitativas do plantio e dos indivíduos (falhas de plantio, árvores mortas, quebradas, bifurcadas, etc.)

Para as árvores que não tiveram a altura estimada em campo foi aplicado modelo – chamado de relação hipsométrica – que tem como variável independente o DAP e, como variável dependente, a altura (Equação 1). O ajuste dos parâmetros do modelo foi realizado com os dados da própria área.

$$\ln H = \beta_0 + \beta_1 dap^{-1} + \varepsilon \quad (1)$$

Em que:

H = altura

β_0, β_1 = parâmetros do modelo

dap = diâmetro à altura do peito

ε = erro de estimativa do modelo

De posse dos dados de diâmetro foi calculada a distribuição diamétrica do conjunto de árvores medidas, e três classes de diâmetro propostas, seguindo o critério (Equação 2):

$$LCld = \mu \pm \sigma \quad (2)$$

em que:

LCld = limite (inferior ou superior) da classe de diâmetro

μ = média dos DAPs

σ = desvio padrão

Na cubagem os indivíduos selecionados foram abatidos e tiveram medidos os diâmetros (suuta, mesmo procedimento da mensuração) ao longo do fuste nas alturas 0,1, 0,3, 0,7, 1,0, 1,3 e 2,0 m, e depois de 01 em 01 metro até a altura total.

Para estimativa do volume total da árvore é executada a soma do volume de sucessivas seções de tronco ao longo do fuste, desde a altura de 0,1m até a altura total. O volume de cada seção é obtido pela aplicação de uma Equação de Cubagem (Equação 3), tendo sido a proposta por Smalian a equação utilizada neste trabalho, dada por:

$$V = \frac{\pi}{80000} (D_1^2 + D_2^2) L \quad (3)$$

Em que,

V = volume da seção em m³

D₁ = diâmetro na extremidade 1 da tora em cm

D₂ = diâmetro na extremidade 2 da tora em cm

L = comprimento da tora em m

3.3. Varredura laser

Os dados LiDAR foram gerados pelo equipamento RIEGL modelo VZ-400 V-Line® 3D Terrestrial Laser Scanning (RIEGL Laser Measurement Systems GmbH)(Figura 2), equipamento que utiliza a técnica de *phase shift* para determinação das distâncias dos retornos. As características operacionais do scanner foram resumidas na Tabela 2.

Figura 2. Aparelho TLS RIEGL VZ-400, utilizado na geração de dados LiDAR neste trabalho.

Tabela 2: características do equipamento laser scanner RIEGL VZ-400 utilizado na obtenção dos dados.

Faixa espectral	1550 nm
Abertura do feixe	0,35 mrad
Pulsos por segundo	122.000
Taxa de repetição do pulso	300 kHz
Distância mínima	1,5 metros
Distância máxima	350 metros

O RIEGL VZ-400 opera com ângulo azimutal de 360° e ângulo zenital de 30° a 130° e, por isso, para uma tomada completa do ambiente, deve-se fazer o varredura com o aparelho na posição vertical e, sem seguida, tombá-lo em 90° sobre o tripé de fixação para realização de leitura completa no sentido vertical (z)(Figura 2).

Em cada uma das áreas experimentais foram delimitadas duas áreas sobrepostas de formatos diferente (Figura 3):

- Área quadrada com lados medindo 30 m (área de 900 m^2) – layout da varredura; ao longo dos lados do quadrado foram estabelecidos os pontos de posicionamento do *scanner*;
- Área circular de raio 11,28 m (área de 400 m^2), circunscrito ao quadrado tendo dois dos lados deste formando retas tangentes ao círculo (FIGURA 3) – representando a medição de uma parcela padrão de Inventário Florestal de florestas plantadas de rápido crescimento.

Figura 3. Layout das áreas de medição em campo.

A área de formato quadrado foi instalada considerando-se um dos vértices como ponto inicial (P0), a partir do qual foi demarcado um dos lados do “quadrado” paralelo às linhas de plantio; o ponto P0 foi marcado na média da distância entre estas duas linhas de plantio. A partir do P0 e em sentido diagonal para dentro da área quadrada foi medida a distância referente ao centro da área circular, locada de forma que dois lados da área quadrada fossem retas tangentes ao limite da área circular.

3.4. Processamento das nuvens e extração de métricas

O procedimento inicial após a varredura do ambiente é o correto registro das nuvens. Na varredura múltipla o *output* do equipamento é composto por vários arquivos independentes que correspondem, cada um, a uma varredura do ambiente. Como ocorre uma evidente sobreposição das áreas escaneadas – e assim é desejado –, as nuvens independentes devem ser unidas de modo que as partes sobrepostas se equivalham. Para isso são usados objetos de formato circular fabricados em material refletivo (Figura 4), chamados de “alvos”. Em cada varredura foram utilizados 10 alvos espalhados pela área experimental de forma que pudessem ser localizados por pelo menos dois dos pontos de fixação do equipamento. Os alvos foram alocados tanto no nível do solo quanto sobre estacas, de forma que, a cada deslocamento do aparelho para realização de nova varredura, todos os alvos visíveis pelo equipamento foram girados em torno do próprio eixo para que o ângulo de incidência dos pulsos laser fosse o mais perpendicular possível.

Figura 4. Exemplo de alvo utilizado para corregristo das nuvens (esq.). O objeto é composto de material refletivo e pode ser localizado com facilidade durante o processamento inicial das nuvens. À direita a imagem mostra um dos alvos fixados ao nível do solo.

Um mesmo alvo, ao ser identificado em mais de uma nuvem, permite o corregristo destas, de forma que nuvens de pontos com sistemas de coordenadas locais independentes passam a pertencer a uma única nuvem com sistema de coordenadas locais, procedimento que foi realizado pelo software RiscanPro® (RIEGL). Neste trabalho optou-se por localizar o ponto central $p(0,0,0)$ no ponto de varredura P0.

O procedimento inicial de tratamento das nuvens consistiu na classificação automática dos pontos pertencentes ao chão e normalização das nuvens de pontos correspondentes a cada área experimental. Algoritmos do software LasTools® (ISENBURG, [s.d.]) buscam e classificam, por meio de triangulação, padrões planejados de distribuição de pontos usando principalmente os últimos retornos, retornando ao usuário as classes *terreno* e *não-terreno*. Desta forma é possível aplicar a próxima rotina do mesmo software que, considerando apenas os pontos *não-chão*, atribuem valores de z crescentes no sentido ascendente, ou seja, considera como $z = 0$ os pontos classificados como terreno e computa a distância de cada ponto ao longo do eixo z em relação ao ponto do terreno mais próximo.

As nuvens correspondentes a cada árvore utilizada para extração de métricas foram manualmente extraídas da nuvem original (varredura múltipla), em que foi determinado o centro aproximado da base da árvore à altura do solo $(x, y, 0)$. A partir deste ponto um círculo com raio de 1,0m foi traçado e a coluna de pontos resultante (cilindro de raio = 1,0 m) foi considerada como representante de uma árvore (FIGURA 4).

Figura 5. Exemplo de nuvem de árvore individual de *Pinus* usada para extração de métricas.

Eliminação de ruídos e isolamento do fuste via Transformação de Hough

A Transformação de Hough é um método utilizado para detecção de formas pré-definidas em planos de duas dimensões, ou seja, busca padrões geométricos (neste caso, círculos) em imagens bidimensionais. O algoritmo trabalha com rasters gerados a partir do seccionamento da nuvem de pontos ao longo do eixo z.

Em cada pixel do raster gerado é calculada a densidade de pontos – relativa ao pixel com maior número de pontos – e são considerados no processamento somente pixels com valor de densidade mínimo pré-estabelecido (p. ex., 20% de densidade). O algoritmo trabalha então com interações: em cada interação é gerado círculo de raio r_i em todos os pixels selecionados, e um novo raster é gerado informando a quantidade de círculos que interseccionaram em cada pixel (chamado a partir de agora de votos). O pixel com o maior número de votos na interação i é considerado o centro de um círculo de raio r_i . Após execução de todas as interações (com limites inferior e superior de raio testado pré-definidos) o centro do pixel com maior número de votos é considerado o melhor candidato a “círculo real”. O *output* desse processo é uma nuvem de pontos que representam de forma robusta o fuste e possui ainda algum ruído.

Ajuste de circunferências e extração dos diâmetros

No ajuste de círculos pelo método RANSAC (Random Sample Consensus) interações são aplicadas para se verificar a probabilidade de que uma amostra aleatória em um conjunto de dados não contenha *outliers*, ou seja, de que todas as observações de uma amostra aleatória pertençam a um modelo. Neste caso o *input* é a nuvem de pontos filtrada (Transformação de Hough) e o modelo é de uma circunferência. A nuvem de pontos é dividida em seções de 0,30 m de altura (z), e estas são projetadas no plano 2D, para em seguida sofrerem as interações de ajuste do modelo da circunferência (FIGURAS 6 e 7).

Figura 6. Representação da aplicação do algoritmo de RANSAC no ajuste de circunferências. As esferas azuis são os pontos (x, y) consideradas para ajuste do modelo de círculo. O círculo em vermelho representa a amplitude de variação da amostra e o círculo preto é o resultado do ajuste do modelo.

A circunferência com menor RSEQ (Equação 4) da distância euclidiana dos pontos que a originaram ao seu centro estimado (x,y) será considerada a potencial verdadeira.

$$RSEQ = \sqrt{\sum_{i=1}^n (d_i - r)^2} \quad (4)$$

Em que:

$RSEQ$ = raiz da soma dos erros quadráticos;

d_i = distância euclidiana de dado ponto ao centro (x,y) estimado da circunferência

r = raio estimado

O *output* desta etapa é uma relação de circunferências de raio estimado r , centro (x,y) e altura z . Esta relação, no entanto, não coincide com as alturas z consideradas na cubagem das árvores (item 3.2). Para que a mesma altura fosse considerada em ambos os métodos de maneira que permitisse a comparação entre as duas metodologias, foi considerado o valor médio das duas extremidades (z) do cilindro utilizado pelo algoritmo de RANSAC para geração do raster sobre o qual as iterações foram aplicadas. Exemplificando, para obtenção do diâmetro da circunferência da altura de 2,0 m a partir da saída do RANSAC, o cilindro de 0,30 m utilizado pelo algoritmo foi obtido entre as alturas de 1,85 m e 2,15 m. O mesmo procedimento foi aplicado nas nuvens para todas as alturas que foram consideradas na cubagem (0,30, 0,70, 1,0, 1,30 m, e assim por diante). Assim garantiu-se que a comparação entre os diâmetros da cubagem e do algoritmo de RANSAC foi realizada na mesma altura (z). A Figura 7 demonstra o procedimento.

Figura 7. Esquema gráfico que representa a “fatia” de nuvem utilizada pelo algoritmo de RANSAC para geração do arquivo raster e consequente obtenção da circunferência modelada. A espessura da “fatia” foi de 0,30 m, e a altura (z) considerada para localização da circunferência foi o valor de z médio entre o z máximo e o z mínimo (topo e base da “fatia”).

3.5. Análise estatística

A exatidão das estimativas foi avaliada pela análise dos resíduos resultantes da comparação entre métricas extraídas das nuvens e os valores obtidos pela

cubagem, para as variáveis diâmetro ao longo do fuste e volume de toras. Foram calculados o viés estatístico e a raiz quadrada do erro médio (REQM), descritos nas Equações 5 e 6, respectivamente. O Coeficiente de Correlação de Pearson (r), valor que expressa a força da associação entre duas variáveis, também foi aplicado aos conjuntos de dados.

$$viés = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - x_i) \quad (5)$$

Em que:

$viés$ = erro médio

$\hat{x}$ = valor estimado na i ésima observação

x = valor observado na i ésima observação

n = número de observações

$$REQM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - x_i)^2} \quad (6)$$

Em que:

$REQM$ = raiz do erro quadrado médio

$\hat{x}$ = valor estimado na i ésima observação

x = valor observado na i ésima observação

n = número de observações

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente são mostrados os resultados das medições em campo com a metodologia chamada aqui de “tradicional”: medição de DAP e altura, cubagem e cálculo do volume, dados que serão usados como validação para os resultados do processamento das nuvens de pontos. Segue-se com a primeira etapa aplicada às nuvens de pontos individuais, em que é avaliada a capacidade dos algoritmos em filtrar e modelar a forma das árvores. Em seguida são apresentados resultados para DAP e diâmetros ao longo do fuste e, por fim, o cálculo do volume a partir dos diâmetros estimados.

4.1. Medições em campo e cubagem

A densidade de plantas na área de *Pinus*, de 1.925 indivíduos/ha ficou acima da prevista na área (667 indivíduos/ha) após desbaste de 40% em plantio com previsão de 1.667 indivíduos/ha (baseando-se no espaçamento). Essa discrepância pode ter ocorrido devido à localização da área experimental em relação ao alinhamento de plantio no talhão, por ter sido instalada em ponto de estreitamento das curvas de nível devido à topografia do terreno e que, por isso, apresenta aproximação das linhas de plantio e consequente aumento da densidade de plantas.

A definição de número de amostras na etapa da volumetria (cubagem), além de se valer das premissas estatísticas apresentadas, esteve submetida a restrições operacionais que limitaram o número de árvores passíveis de abatimento.

4.2. Processamento de dados TLS

O desempenho dos algoritmos utilizados foi analisado pelo percentual em do fuste das árvores que foi filtrado e teve círculos modelados, em relação às alturas total e comercial para cada amostra (Tabela 6). Os resíduos de tais relações são mostrados na Figura 5.

Tabela 6. Percentual da altura das árvores até a qual os algoritmos de filtragem e ajuste de circunferências foram capazes de gerar valores. H total = altura total medida com trena na árvore abatida; H comercial = altura medida com trena na árvore abatida até a inserção do primeiro galho; H filtro = altura máxima obtida pelo algoritmo Transformação de Hough; H AC = altura máxima obtida pelo algoritmo Ajuste de Circunferência de RANSAC. “H filtro / H total” representa o quanto, em relação à altura total, a transformação de Hough foi capaz de filtrar e isolar o fuste; valores acima de 100% indicam que o algoritmo encontrou padrões que considerou “fuste” acima da altura total considerada pela tomada em campo. “H AC / H total” indica a altura máxima em que círculos foram modelados à nuvem de pontos já filtrada.

Espécie	Árvore	H total (m)	H comercial (m)	H filtro (m)	H AC (m)	H filtro / H total	H AC / H total	H AC / H comercial
<i>Eucalyptus sp.</i>	1	20,8	19,1	21,3	9,0	102,4%	43,3%	47,1%
	2	17,5	16,5	19,7	15,0	112,6%	85,7%	90,9%
	3	22,7	21,4	22,8	12,0	100,4%	52,9%	56,1%
	4	20,1	19,5	20,9	7,0	104,0%	34,8%	35,9%
	5	21,8	20,1	21,0	6,0	96,3%	27,5%	29,9%
	6	21,0	19,9	20,9	8,0	99,5%	38,1%	40,2%
	média	20,7	19,4	21,1	9,5	102,5%	47,0%	50,0%
<i>Pinus elliotii</i> var. <i>elliotii</i>	1	21,7	20,8	20,2	14,0	93,1%	64,5%	67,3%
	2	18,0	16,4	17,8	9,0	98,9%	50,0%	54,9%
	3	19,0	17,9	17,2	7,0	90,5%	36,8%	39,1%
	4	16,5	15,5	17,4	8,0	105,5%	48,5%	51,6%
	5	18,7	17,5	18,8	13,0	100,5%	69,5%	74,3%
	média	18,8	17,6	18,3	10,2	97,7%	53,9%	57,4%
Média						100,3%	50,2%	53,4%

Figura 8. Resíduos percentuais das alturas alcançadas pelas etapas de filtragem e ajuste de circunferências.

A etapa de filtragem (Transformação de Hough) foi capaz de filtrar os pontos considerados como pertencentes ao tronco em 100,3% da altura comercial das árvores. O valor do resíduo médio dos *Eucalyptus*, de 2,5%, indica que o algoritmo considerou pontos como sendo do fuste onde não mais havia tronco, e justifica o valor maior de 100%. As amostras de *Pinus* apresentaram valor de -2,3% para esta variável, e a média para todas as amostras foi de 0,3%.

Os resíduos das estimativas da etapa de ajuste de circunferências (Círculos de RANSAC) em relação à altura total apresentaram valor médio de -50,2%, indicando que circunferências foram automaticamente ajustadas à forma do fuste até 49,8% da altura das árvores nas duas espécies. Este valor foi de 47% para o *Eucalyptus* e de 53,9% para o *Pinus*. LIANG et al., 2014, estudando 28 árvores de espécies temperadas, alcançou, para a mesma variável, altura média de 65,8% para indivíduos de *Pinus* e de 61,0% para espécimes de *spruce*.

A interpretação destes resultados deve considerar dois aspectos que se destacaram na obtenção dos dados em campo. Primeiramente, o trabalho de varredura foi marcado por intensidade alta de vento em campo, especialmente na área com *Eucalyptus* sp., e as características deste povoamento – alta densidade e altura média elevada associada à pequena copa – contribuíram para que as árvores sofressem grande perturbação pelo vento e os fustes se deslocassem a grande distância de seu eixo original. A Figura 6 mostra como esse efeito foi captado pela varredura: a nuvem de uma árvore individual passou a ser composta por diversos fustes “fantasmas” que são a representação do fuste original quando este foi escaneado no momento em que estava deslocado pelo vento.

Figura 9. Exemplos de fustes “fantasmas” de *Eucalyptus* sp. ocasionados pela alta incidência de ventos no momento da varredura.

A influência do vento sobre a varredura foi explorada por meio da análise visual de recortes transversais das nuvens individuais. Essa abordagem visou embasar o argumento de que o deslocamento dos fustes durante a varredura por

conta do vento prejudicou o desempenho dos algoritmos na individualização do fuste e no ajuste de circunferências ao longo dele. A Figura 9 exemplifica essa situação.

Figura 10. Recorte transversal da nuvem da árvore 01 do *Eucalyptus*. À esquerda, corte feito entre as alturas de 0,89 e 1,78 m; à direita, corte entre as alturas de 6,23 e 7,12 m. Pode-se observar a perda de padrão circular nos pontos na faixa mais alta.

A análise visual da árvore 01 do *Eucalyptus* evidencia que, a partir dos 6,23 m de altura, houve perda do padrão circular no conjunto de pontos que representa um corte transversal no tronco e que serve de entrada para o ajuste do modelo de circunferência pelo algoritmo de RANSAC. Como a altura total dessa árvore é de 20,8 m e a altura atingida pelo algoritmo foi de 43%, ou 8,9 m, entende-se que essa análise visual corrobora a tese de que a mudança de localização do fuste durante a varredura por causa do vento prejudicou o desempenho do algoritmo que ajusta circunferências ao longo da nuvem de pontos de árvore individuais.

Os resultados da comparação dos diâmetros à altura do peito (DAP) na escala de árvore individual é mostrado na Tabela 7.

Tabela 7. Dados da comparação entre valores de DAP obtidos em campo (DAP campo) e via processamento das nuvens de pontos (DAP TLS) e análise estatística (viés e REQM) dos resultados.

Espécie	Árvore	DAP campo (cm)	DAP TLS (cm)	viés (cm)	REQM (cm)	REQM%
<i>Eucalyptus sp.</i>	1	12,9	14,1	1,2	0,91	7,1%
	2	8,2	8,5	0,3		
	3	16,8	16,5	-0,3		
	4	11,9	10,3	-1,5		
	5	13,7	13,9	0,3		
	6	13,3	14,2	0,9		
média		12,8	12,9	0,13		
<i>Pinus elliotii</i> var. <i>elliotii</i>	1	28,9	28,6	-0,2	2,77	14,1%
	2	18,1	16,6	-1,5		
	3	18,7	24,1	5,4		
	4	14,2	11,8	-2,4		
	5	18,3	17,0	-1,3		
média		19,6	19,6	0,01		
Média geral		15,9	16,0	0,08	1,99	12,5%

A estimativa de DAP pelo processamento das nuvens TLS apresentou REQM de 1,99 cm para todas as amostras (0,91 cm para o *Eucalyptus* e 2,77 cm para o *Pinus*, respectivamente) e REQM% de 12,5% na média geral. Estes resultados estão coerentes com os observados em estudos semelhantes como, por exemplo, LIANG & HYYPPÄ, 2013, que obtiveram valores de REQM variando entre 0,7 e 2,4 cm em cinco parcelas analisadas.

A análise do viés mostra que, no geral, a obtenção dos valores de DAP via TLS foi superestimada, embora, no *Pinus*, uma única amostra com valor positivo elevado tenha se distanciado das demais, todas negativas (viés variando entre -2,4 e 5,4 cm). Pode-se constatar, ainda, que as variações nas estimativas foram igualmente distribuídas entre valores positivos e negativos para ambas as espécies.

Ainda dentro do contexto de estimativa de diâmetros, a Figura 7 e a Tabela 8 mostram os valores de diâmetro observados (cubagem) e estimados (TLS) comparados em nível geral e por espécie. Ambas etapas de processamento das nuvens – filtragem e ajuste de circunferências – fornecem valores de diâmetro em determinada altura; no entanto, neste trabalho a Transformação de Hough foi usada apenas para filtragem dos pontos laser pertencentes ao tronco, e os valores de diâmetro considerados foram extraídos dos círculos ajustados pelo algoritmo RANSAC.

Figura 11. Diâmetros observado e estimado para as duas espécies.

Tabela 8. Resumo da comparação entre diâmetros observados e estimados. O viés das estimativas foi negativo para ambas as espécies, sugerindo superestimativas dos valores gerados pelo ajuste de circunferências nas nuvens de pontos.

Espécie	n	viés (cm)	REQM (cm)	r
<i>Pinus sp.</i>	71	-0,298	3,62	0,84
<i>Eucalyptus sp.</i>	81	-0,138	2,75	0,77
Total	152	-0,213	3,18	0,86

Ao todo 152 diâmetros foram comparados, com coeficiente de correlação de Pearson (r) de 0,86; as amostras de *Pinus* tiveram $r = 0,84$ e os *Eucalyptus*, 0,77, evidenciando menor força de associação entre os métodos para as amostras desta espécie. O valor médio de REQM para todas as amostras foi de 3,18 cm está coerente com valores encontrados na literatura, como MAAS et al., 2008, e LIANG et al., 2014 que encontraram valores médios de REQM de 4,7 cm e 1,13 cm, respectivamente. Os valores negativos de viés para ambas as espécies e média (-0,213 cm) aponta tendência de superestimativas pelo método estudado.

Os resíduos percentuais das estimativas do diâmetro são mostrados na Figura 8, para as duas espécies, nas alturas em que o diâmetro foi estimado (H_i). Os resíduos do *Eucalyptus* apresentaram tendência de valores negativos na porção inferior do tronco, com aumento destacado na amplitude a partir de 4,0 m de altura, e distribuição homogênea entre valores positivos e negativos a partir desta altura.

Nas amostras de *Pinus* os resíduos apresentaram comportamento semelhante, com tendência de valores negativos dos resíduos nas porções inferiores do tronco, redução dos valores entre as alturas 2,0 e 5,0 m e aumento da amplitude – igualmente distribuída entre valores positivos e negativos – a partir de 5,0 m de altura.

Figura 12. Distribuição do resíduo percentual dos diâmetros em relação à altura (H_i) em que o diâmetro foi estimado.

Um dos parâmetros do algoritmo de filtragem dos dados é o tamanho do pixel, sobre o qual é calculada a densidade de pontos do raster gerado. Este tamanho é mantido constante durante as interações que o algoritmo realiza ao longo do fuste, isto é, o mesmo tamanho de pixel é considerado tanto para filtragem do tronco nas alturas mais baixas (base da árvore, com os maiores diâmetros) quanto nas alturas mais elevadas (menores diâmetros). Como o ajuste de circunferências é decorrente da etapa de filtração, analisou-se os resíduos oriundos da comparação entre diâmetros observados e estimados pelo RANSAC em diferentes classes de diâmetro. Os resultados são mostrados na Figura 9.

Figura 13. Boxplot dos resíduos dos diâmetros (m) em relação a classes de diâmetro.

A divisão por classe de diâmetro permite que seja verificado o comportamento das estimativas em relação a variações no diâmetro, sem levar em conta a altura em que o diâmetro foi estimado. Sob a ótica do padrão de afilamento dos fustes é esperado que os diâmetros maiores – isto é, mais perto da base da árvore, e, portanto, mais próximos à altura de visada do equipamento – apresentem maior exatidão nas estimativas que os diâmetros menores, que estão presentes nas maiores alturas e por isso são mais sujeitos aos efeitos de oclusão e vento. Análise dos gráficos do tipo *boxplot* (Figura 9) sugerem tendência de superestimativas dos diâmetros nas classes de diâmetro superiores para ambas as espécies.

A análise gráfica dos resíduos dos diâmetros em relação a alturas relativas (Figura 8) sugere redução dos resíduos percentuais nas alturas relativas (h_i/ht) de 0,1 e 0,2. Para confirmação desta percepção os resíduos dos diâmetros foram avaliados de acordo com as alturas absolutas das árvores, divididas em classes com intervalo de 1 metro até os 4 m de altura e em intervalos de 2 m a partir dos 4 m (Figura 10).

Figura 14. Boxplot dos resíduos dos diâmetros em relação a classes de altura absoluta.

Pode-se observar que, para o *Eucalyptus*, os resíduos foram menores até o intervalo de altura de 4 a 6 m, e tiveram os menores valores entre 1 e 2 m, altura em que o equipamento laser scanner terrestre operou. Para as árvores de *Pinus* os menores resíduos foram nos intervalos de 1 a 3 e 4 a 10 m, tendo havido os maiores desvios na base das árvores (0 a 1 metro), no intervalo de 3 a 4 m e acima dos 10 m.

Estes resultados confirmam as observações dos gráficos de resíduos dos diâmetros em relação a alturas relativas das árvores, isto é, a exatidão maior na estimativa dos diâmetros, para ambas as espécies, ocorreu no intervalo entre 1 e 3 m de altura.

O procedimento de filtragem do tronco (Transformação de Hough) teve desempenho eficiente e foi capaz de filtrar o tronco em quase toda a altura das amostras. As amostras que tiveram valores maiores que 100% sugerem que o algoritmo encontrou parâmetros circulares que representariam o tronco além da altura total da árvore medida em campo. Como os diâmetros considerados no trabalho foram obtidos do método seguinte à filtração, este fato não foi considerado defeito na aplicação do algoritmo Transformação de Hough.

A altura alcançada pelo algoritmo de RANSAC no ajuste de circunferências, entretanto, ficou aquém do esperado e de maneira geral menor que o encontrado por outros trabalhos. Ainda que a modelagem do afilamento do fuste seja um campo dentro da aplicação do TLS em manejo florestal que careça de estudos em maior

quantidade e nível de detalhamento – embora crescentes (LIANG et al., 2016), alguns estudos já realizados chegaram a resultados satisfatórios.

O máximo em altura dos diâmetros estimados automaticamente foi descrito entre 50,6% e 74,5% por LIANG et al., 2014, em 28 árvores analisadas, com viés de 0,15 cm e REQM de 1,13 cm na escala da árvore. BUCK, 2016, chegou a 69% da altura total alcançada pelo procedimento de filtragem aplicados à povoamento de *Eucalyptus* de 5 anos.

Dois fatos presentes na coleta de dados de campo podem ter afetado a qualidade dos resultados apresentados até aqui. A área com *Eucalyptus* sofreu intensa influência de vento no momento da coleta e fez com que as árvores se deslocassem distância elevadas em relação ao seu eixo original, gerando, no momento da varredura, fustes falsos ou “fantasmas”. Na área de *Pinus*, por outro lado, pode-se sugerir que a alta densidade de fustes, aliada à presença de muito galhos e copas a altura relativamente baixas, pode ter contribuído para o baixo desempenho do ajuste de circunferências. O algoritmo de Hough aparentemente foi capaz de superar estes problemas, atingindo alturas elevadas nas suas interações, mas o mesmo não pode ser dito pelo algoritmo de RANSAC. Como este depende dos dados de saída do algoritmo de Hough, sugere-se que estudos mais aprofundados sejam conduzidos visando maior compreensão da interdependência entre algoritmos sequenciais de filtragem e modelagem de fustes.

A exatidão de dados TLS oriundos dos estratos superiores do dossel florestal ainda é desafio neste campo de pesquisa, devido aos efeitos de oclusão crescentes no sentido base-topo das árvores, principalmente na escala de parcela. TANSEY et al., 2009 descreveram a dificuldade em estimar a altura das árvores e diâmetros superiores, tanto na escala individual quanto de parcela, enquanto HENNING; RADTKE, 2008, em um dos estudos pioneiros no tema, viram o REQM da estimativa de diâmetros dobrar a partir dos 13 m de altura. HOPKINSON et al., 2004, por outro lado, estimaram a altura de árvores no nível parcela, mas trabalharam com povoamentos de baixa densidade ($< 600 \text{ ind.ha}^{-1}$).

A estimativa do DAP é um dos procedimentos aplicados a levantamentos TLS em florestas desde os trabalhos pioneiros na área (MAAS et al., 2008), devido à importância da estimativa para o inventário florestal e à facilidade de obtenção dos valores, tanto em campo (validação) quanto a partir das nuvens de pontos. A facilidade da extração desta métrica de nuvens de pontos decorre de a altura de

operação do scanner estar geralmente na mesma faixa de altura que o DAP (1,30), o que diminuiria o efeito da angulação de incidência dos feixes laser. No entanto, a maioria dos estudos foram conduzidos em florestas temperadas, e mais estudos são necessários em diferentes tipologias florestais, uma vez que os resultados podem variar entre estas (LIANG et al., 2016). KANKARE et al., 2015, por exemplo, estudando diferentes contextos florestais, encontrou exatidão na estimativa de DAPs entre 1,4 e 2,0 cm, enquanto que OLOFSSON et al., 2014, obteve valores de REQM entre 2,0 e 4,2 cm e YAO et al., 2011, chegaram nos 7,6 cm.

Os valores encontrados neste trabalho na estimativa do DAP, com REQM de 1,99 cm e viés de 0,08 cm são satisfatórios e demonstram alta exatidão dos métodos empregados para esta estimativa. A ausência de ruídos excessivos em campo (sub-bosque e galhos caídos) na faixa de altura do DAP e a abordagem da varredura múltiplo podem explicar os resultados. Ainda, devido à idade dos povoamentos, da altura média e diâmetro médio, os efeitos de vento descritos não afetaram a tomada de diâmetro na faixa dos 1,30 m.

O cálculo de volume seguiu o mesmo padrão de distribuição dos erros que a estimativa dos diâmetros, e isso pode ser explicado pelo método de cálculo volumétrico, que usou o diâmetro das extremidades das seções do tronco para aplicação da equação de Smalian (Equação 3). Desta forma, o aumento dos resíduos do volume das seções foi crescente no sentido base-topo, comportamento também observado por BUCK, 2016.

O cálculo do volume dos troncos foi restrito à altura até a qual extraíram-se os diâmetros e, nesse contexto, consideram-se satisfatórios os resultados (10,8% de resíduo percentual médio e 13,6% e 7,5% para *Eucalyptus* e *Pinus*, respectivamente). LIANG et al., 2014, obteve 8,9% e 9,8% de REQM% para duas espécies diferentes, enquanto que PUESCHEL et al., 2013, obteve viés percentual de -2% a 6% para varreduras múltiplos e -34% a 44% em varreduras simples.

O cálculo do volume via levantamento TLS, no entanto, deve ser aprofundado no sentido da modelagem do fuste inteiro, campo em que a literatura tem apresentado número crescente de estudos, uma vez que tanto o volume quanto as estimativas de biomassa são de grande interesse do manejo florestal e da ecologia. O método proposto neste trabalho, de aplicar equações de cálculo de volume de toretes a partir de diâmetros ajustados ao longo do fuste, no entanto, não

foi bem-sucedido a partir do momento em que os algoritmos não ajustaram circunferências ao longo de todo o fuste.

4.3. Considerações

Faz-se necessário, na opinião deste autor, que sejam apresentados e aprofundados mecanismos de mitigação de efeitos ambientais adversos que possam ocorrer na ocasião da varredura, como, por exemplo, a eliminação de ruídos ocasionados pelo deslocamento dos objetos por causa do vento. Nestes casos a etapa de filtragem dos pontos que representem as árvores adquire importância ainda maior e métodos automatizados devem ser objetivo de investigação. As florestas plantadas de alta densidade e ciclo curto são pouco exploradas pelos estudos em TLS e, considerando que o efeito da oclusão pode ser maior nestas tipologias florestais do que naquelas maduras e menos densas, é recomendado esforço crescente da comunidade científica para entender o comportamento dos resultados das varreduras terrestres a laser em relação aos parâmetros básicos do sistema, como geografia da varredura e níveis de automatização e exatidão da filtragem dos fustes.

O autor sugere ainda que, em vista da rapidez com que surgem no mercado equipamentos de varredura a laser mais leves, de baixo custo e com alta (ou suficiente) exatidão, o desenvolvimento de métodos de tratamento de nuvens de pontos laser deve focar também na rapidez com agregação de qualidade, a fim de que a tecnologia que está sendo apresentada e testada adquira status de ferramenta adequada para a obtenção de dados de interesse do manejo florestal.

5. CONCLUSÃO

Os procedimentos empregados em campo e na geração e processamento de dados tridimensionais, no contexto apresentado neste trabalho, foram suficientes para obtenção de métricas de interesse florestal a partir da varredura laser terrestre. O nível de erro encontrado em algumas das comparações, embora destoante em um possível cenário de quantificação dos recursos com alta exatidão, esteve coerente com os números encontrados na literatura.

Desta forma, conclui-se que o método de varredura por laser scanner terrestre é capaz de fornecer estimativas de variáveis dendrométricas em árvores individuais com níveis de exatidão elevados quando comparado aos métodos tradicionais de mensuração florestal.

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A.; STAPE JOSÉ LUIZ AND SENTELHAS, PAULO CESAR AND DE MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ASTRUP, R. et al. Approaches for estimating stand-level volume using terrestrial laser scanning in a single-scan mode. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 44, n. 6, p. 666–676, jun. 2014.
- BATISTA, J. L. F.; COUTO, H. T. Z.; SILVA FILHO, D. F. **Quantificação de recursos florestais**. [s.l.] Oficina de textos, 2014.
- BAYER, D.; SEIFERT, S.; PRETZSCH, H. Structural crown properties of Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* [L.]) in mixed versus pure stands revealed by terrestrial laser scanning. **Trees**, v. 27, n. 4, p. 1035–1047, 2013.
- BÉLAND, M. et al. Estimating leaf area distribution in savanna trees from terrestrial LiDAR measurements. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 151, n. 9, p. 1252–1266, set. 2011.
- BIENERT, A. et al. Application of terrestrial laser scanners for the determination of forest inventory parameters. **Int. Arch. Photogramm., Remote Sens. Spatial Inform. Sci.**, v. 36, 2006.
- BROLLY, G.; KIRÁLY, G. Algorithms for stem mapping by means of terrestrial laser scanning. **Acta Silvatica et Lignaria Hungarica**, v. 5, 2009.
- BROLLY, G.; KIRÁLY, G.; CZIMBER, K. Mapping forest regeneration from terrestrial laser scans. **Acta Silvatica et Lignaria Hungarica**, v. 9, n. 1, 2013.
- BUCK, A. L. B. **Modelagem de dados laser scanner terrestre para estimativa do volume em plantios clonais de Eucalyptus spp.** [s.l.] UFPR, 2016.
- CALDERS, K. et al. Monitoring spring phenology with high temporal resolution terrestrial LiDAR measurements. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 203, p. 158–168, abr. 2015.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração Florestal: perguntas e respostas**. 3. ed. [s.l.] Editora UFV, 2009.

DANSON, F. M. et al. **Forest Canopy Gap Fraction From Terrestrial Laser Scanning** *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2007.

DANSON, F. M. et al. Developing a dual-wavelength full-waveform terrestrial laser scanner to characterize forest canopy structure. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 198–199, p. 7–14, nov. 2014.

DUCEY, M. J.; ASTRUP, R. Adjusting for nondetection in forest inventories derived from terrestrial laser scanning. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 39, n. 5, 2013.

EITEL, J. U. H.; VIERLING, L. A.; MAGNEY, T. S. A lightweight, low cost autonomously operating terrestrial laser scanner for quantifying and monitoring ecosystem structural dynamics. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 180, p. 86–96, out. 2013.

GARCÍA, M. et al. Terrestrial laser scanning to estimate plot-level forest canopy fuel properties. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 13, n. 4, p. 636–645, ago. 2011.

GARCÍA, M. et al. Canopy clumping appraisal using terrestrial and airborne laser scanning. **Remote Sensing of Environment**, v. 161, p. 78–88, fev. 2015.

GAULTON, R. et al. The potential of dual-wavelength laser scanning for estimating vegetation moisture content. **Remote Sensing of Environment**, v. 132, p. 32–39, maio 2013.

HAUGLIN, M. et al. Estimating single-tree branch biomass of Norway spruce by airborne laser scanning. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 79, p. 147–156, maio 2013.

HENNING, J. G.; RADTKE, P. J. Multiview range-image registration for forested scenes using explicitly-matched tie points estimated from natural surfaces. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 63, n. 1, p. 68–83, jan. 2008.

HOPKINSON, C. et al. Assessing forest metrics with a ground-based scanning lidar. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 34, n. 3, p. 573–583, 2004.

ISENBURG, M. **LAStools – Efficient Tools for LiDAR Processing**, [s.d.]. Disponível em: <<http://lastools.org>>

- JUPP, D. L. B. et al. Estimating forest LAI profiles and structural parameters using a ground-based laser called 'Echidna®☆. **Tree Physiology**, v. 29, n. 2, p. 171, 2009.
- KANKARE, V. et al. Individual tree biomass estimation using terrestrial laser scanning. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 75, p. 64–75, jan. 2013.
- KANKARE, V. et al. Diameter distribution estimation with laser scanning based multisource single tree inventory. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 108, p. 161–171, out. 2015.
- KELBE, D. J. VAN A. ; P. R. ; M. VAN L. ; K. C.-N. Single-Scan Stem Reconstruction Using Low-Resolution Terrestrial Laser Scanner Data. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 8, n. 7, 2015.
- LIANG, X. et al. **Automatic Stem Mapping Using Single-Scan Terrestrial Laser Scanning** **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 2012a.
- LIANG, X. et al. Detecting Changes in Forest Structure over Time with Bi-Temporal Terrestrial Laser Scanning Data. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 1, n. 3, p. 242–255, 2012b.
- LIANG, X. et al. Automated Stem Curve Measurement Using Terrestrial Laser Scanning. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 52, n. 3, p. 1739–1748, 2014.
- LIANG, X. et al. Terrestrial laser scanning in forest inventories. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, fev. 2016.
- LIANG, X.; HYYPPÄ, J. Automatic Stem Mapping by Merging Several Terrestrial Laser Scans at the Feature and Decision Levels. **Sensors**, 2013.
- LICHTI, D.; PFEIFER, N.; MAAS, H.-G. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing theme issue "Terrestrial Laser Scanning". **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 63, n. 1, p. 1–3, jan. 2008.
- LICHTI, D.; SKALoud, J. Registration and Calibration. In: VOSSELMAN, G.; MAAS, H.-G. (Eds.). . **Airborne and Terrestrial Laser Scanning**. [s.l.] Whittles Publishing, 2010. p. 318pp.

LINDBERG, E. et al. Estimation of 3D vegetation structure from waveform and discrete return airborne laser scanning data. **Remote Sensing of Environment**, v. 118, p. 151–161, mar. 2012.

LOVELL, J. L. et al. Measuring tree stem diameters using intensity profiles from ground-based scanning lidar from a fixed viewpoint. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 66, n. 1, p. 46–55, jan. 2011.

MAAS, H. □G. et al. Automatic forest inventory parameter determination from terrestrial laser scanner data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 5, p. 1579–1593, 2008.

MACHADO, S. DO A.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Dendrometria**. [s.l.] Autores, 2003.

MARTINS NETO, R. P. et al. Avaliação da varredura laser terrestre em diferentes distâncias da árvore para mensurar variáveis dendrométricas. **BCG - Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 19, n. 3, p. 420–433, 2013.

MENGESHA, T.; HAWKINS, M.; NIEUWENHUIS, M. Validation of terrestrial laser scanning data using conventional forest inventory methods. **European Journal of Forest Research**, v. 134, n. 2, p. 211–222, 2015.

MOORTHY, I. et al. Field characterization of olive (*Olea europaea* L.) tree crown architecture using terrestrial laser scanning data. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 151, n. 2, p. 204–214, fev. 2011.

MURPHY, G. E. M. E.; ACUNA, M. A. A. A.; DUMBRELL, I. Tree value and log product yield determination in radiata pine (*Pinus radiata*) plantations in Australia: comparisons of terrestrial laser scanning with a forest inventory system and manual measurements. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 40, n. 11, p. 2223–2233, 2010.

NEWNHAM, G. J. et al. Terrestrial Laser Scanning for Plot-Scale Forest Measurement. **Current Forestry Reports**, v. 1, n. 4, p. 239–251, 2015.

OLOFSSON, K.; HOLMGREN, J.; OLSSON, H. Tree Stem and Height Measurements using Terrestrial Laser Scanning and the RANSAC Algorithm. **Remote Sensing**, v. 6, n. 5, p. 4323, 2014.

OLSOY, P. J. et al. Aboveground total and green biomass of dryland shrub derived from terrestrial laser scanning. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 88, p. 166–173, fev. 2014.

OTHMANI, A. et al. Single tree species classification from Terrestrial Laser Scanning data for forest inventory. **Pattern Recognition Letters**, v. 34, n. 16, p. 2144–2150, dez. 2013.

PETRIE, G.; TOTH, C. K. Terrestrial laser scanning. In: **Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing**. [s.l.] CRC Press, 2009. p. 87–128.

PRODAN, M. **Mensura forestal**. [s.l.] San José, Costa Rica Proyecto IICA/GTZ sobre Agricultura, Recursos Naturales y Desarrollo Sostenible, 1997.

PUESCHEL, P. et al. The influence of scan mode and circle fitting on tree stem detection, stem diameter and volume extraction from terrestrial laser scans. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 77, p. 44–56, mar. 2013.

SRINIVASAN, S. et al. Multi-temporal terrestrial laser scanning for modeling tree biomass change. **Forest Ecology and Management**, v. 318, p. 304–317, abr. 2014.

TANSEY, K. et al. Estimating tree and stand variables in a Corsican Pine woodland from terrestrial laser scanner data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 30, n. 19, p. 5195–5209, 22 set. 2009.

VAN LEEUWEN, M. et al. Automated reconstruction of tree and canopy structure for modeling the internal canopy radiation regime. **Remote Sensing of Environment**, v. 136, p. 286–300, 2013.

YANG, B.; DONG, Z. A shape-based segmentation method for mobile laser scanning point clouds. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 81, p. 19–30, jul. 2013.

YAO, T. et al. Measuring forest structure and biomass in New England forest stands using Echidna ground-based lidar. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 11, p. 2965–2974, 2011.

YU, X. et al. Stem biomass estimation based on stem reconstruction from terrestrial laser scanning point clouds. **Remote Sensing Letters**, v. 4, n. 4, p. 344–353, 2013.

ZHAO, F. et al. Measuring gap fraction, element clumping index and {LAI} in Sierra Forest stands using a full-waveform ground-based lidar. **Remote Sensing of Environment**, v. 125, p. 73–79, 2012.

ZHENG, G.; MOSKAL, L. M. Spatial variability of terrestrial laser scanning based leaf area index. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 19, p. 226–237, out. 2012.