



Cálculo de Volume Madeireiro de *Eucalyptus sp.* a Partir de Varredura a Laser

Calculation of Eucalyptus sp. Timber Volume from Laser Scanning

João Victor do Nascimento Lima¹, Álvaro Augusto Vieira Soares², Matheus da Silva Pacheco³ e George Deroco Martins⁴

¹ Universidade Federal de Uberlândia, Monte Carmelo, Brasil. jvictornlima@gmail.com.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3099-1223>

² Universidade Federal de Uberlândia, Monte Carmelo, Brasil. alvaroasoares@gmail.com.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0003-8354>

³ Universidade Federal de Uberlândia, Monte Carmelo, Brasil. mathpachs@hotmail.com.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-0687-0463>

⁴ Universidade Federal de Uberlândia, Monte Carmelo, Brasil. deroco87@hotmail.com.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9738-7325>

Recebido: 09.2024 | Aceito: 11.2024

Resumo: A quantificação precisa do volume de madeira é essencial no gerenciamento da produção madeireira, influenciando decisões como tratamentos silviculturais, colheita e suprimentos. Recentemente, a varredura a laser tem sido usada na mensuração florestal, prometendo eficiência e precisão comparáveis ao inventário tradicional. O *Laser Scanner Terrestre* (TLS) é crucial nesse contexto, permitindo o cálculo do volume de madeira a partir de dados tridimensionais dos fustes das árvores. Este estudo avalia o potencial do LiDAR para medir o volume de madeira de eucaliptos, comparando métodos de cubagem rigorosa (volumes reais) e indireto (volume predito). A análise de precisão da varredura a laser incluiu cálculos como RMSE, RMSE%, desvio padrão e correlação entre os volumes medidos. A Estação Total Robótica (ETR) foi utilizada para medir o Diâmetro à Altura do Peito (DAP) com precisão maior que 10% usando a nuvem de pontos em estado bruto. Houve correlação de 0,761 entre os volumes obtidos pela cubagem rigorosa e o volume calculado pela superfície do fuste. Esses resultados indicam o potencial do LiDAR e do ETR na quantificação precisa do volume de madeira, essencial para o manejo eficiente de áreas florestais.

Palavras-chave: Eucalipto. Volume madeireiro. DAP através de medidas indiretas. Nuvem de pontos.

Abstract: The accurate quantification of wood volume is essential for effective timber production management, impacting decisions such as silvicultural treatments, harvesting, and supply chain logistics. Recently, laser scanning has emerged as a promising technology in forest measurement, offering efficiency and accuracy comparable to traditional inventory methods. Terrestrial Laser Scanner (TLS) plays a pivotal role by providing three-dimensional data of tree stems for wood volume calculation. This study evaluates the potential of Light Detection and Ranging (LiDAR) for estimating eucalyptus wood volume, comparing rigorous cubic measurement methods (actual volumes) with indirect methods (predicted volume). Statistical analysis, including Root Mean Square Error (RMSE), RMSE%, standard deviation, and correlation between measured volumes, was conducted to assess the accuracy of laser scanning. The Robotic Total Station (RTS) was employed to measure Diameter at Breast Height (DBH) with precision under 10%, utilizing raw point cloud data. A correlation of 0.761 was observed between volumes obtained through rigorous cubic measurement and those calculated from stem surface data. These findings highlight the potential of LiDAR and TLS technologies in accurately quantifying wood volume, crucial for efficient forest management.

Keywords: Eucalyptus. Wood volume. Diameter at Breast Height (DBH) through indirect measurements. Point Cloud.

1 INTRODUÇÃO

O setor de silvicultura enfrenta uma escassez de técnicas e metodologias eficazes para a silvicultura de precisão, como destacado por Sobrinho et al. (2018). Métodos clássicos, como a Cubagem Rigorosa com fórmulas de Huber, Newton e Smalian, são robustos e bem estabelecidos, mas exigem o abate da árvore, resultando em altos custos e a necessidade de profissionais qualificados (Floriano, 2021). Outro método tradicional, amplamente reconhecido por sua precisão, mas considerado oneroso, é a xilometria. Nesse procedimento, a tora de madeira é submersa em um tanque nivelado com água, e o volume de água deslocado é medido. Esse volume deslocado representa de forma direta o volume da madeira (G. C. P. Lima et al., 2016).

O Brasil, um dos principais produtores mundiais de *Eucalyptus*, tem investido em pesquisa e desenvolvimento para otimizar a produção de carvão, papel e celulose. Tecnologias como o Laser Scanner Terrestre têm se destacado, permitindo o perfilamento e obtenção de dados tridimensionais (X, Y, Z) do fuste das árvores e cálculo do volume de madeira. Esses dados tridimensionais podem ser processados por algoritmos robustos, como o RANSAC, projetado para identificar formas geométricas, incluindo planos, esferas, anéis, cones e cilindros em nuvens de pontos (Fonseca, 2018).

Lingnau et al., (2008) demonstraram que essa tecnologia fornece resultados precisos na medição de altura em diferentes seções e em simulações de podas e desbastes, desde que bem planejadas. Equipamentos com tecnologia LiDAR realizam varreduras tridimensionais com alta precisão, superando metodologias tradicionais do setor florestal (Almeida, 2018).

Segundo Buck et al. (2012), o levantamento a laser para determinação de volume, através de modelagem tridimensional, mostrou-se promissor em comparação ao método de deslocamento de água (Xilômetro). Estações Totais Robóticas (ETR) com laser scanner oferecem controle preciso durante levantamentos em campo e obtêm automaticamente variáveis dendrométricas como altura do fuste e diâmetro à altura do peito (dap) (Buck et al., 2019).

Apesar das vantagens do LiDAR, ainda existem desafios para a modelagem e cálculo do volume madeireiro. A interpretação dos dados requer expertise técnica, e a qualidade das estimativas pode ser afetada pela densidade do povoamento, presença de obstáculos e distância entre o sensor e o alvo (Martins Neto et al., 2013; Lima, 2023).

Hipótese: A utilização de tecnologias baseadas em sensores LiDAR, combinada com algoritmos robustos de processamento de nuvens de pontos, pode superar as limitações dos métodos tradicionais de quantificação de volume de madeira, como a xilometria e a cubagem rigorosa, fornecendo estimativas mais precisas e custo-efetivas para árvores de *Eucalyptus sp.*, mesmo em ambientes de alta densidade florestal e com obstáculos.

Objetivo: Desenvolver e avaliar a eficiência de metodologias baseadas em sensores LiDAR (ETR) para quantificação do volume de madeira de árvores de *Eucalyptus sp.*, utilizando dados tridimensionais obtidos em campo. O estudo buscará otimizar o processamento desses dados por meio de algoritmos para propor modelos precisos, replicáveis e economicamente viáveis, comparando os resultados com métodos tradicionais amplamente utilizados na silvicultura.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Área de estudo

Para o desenvolvimento deste estudo, foi utilizada a área experimental localizada na Unidade Araras, do Campus Monte Carmelo, da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), no município de Monte Carmelo - MG (Figura 1), onde, o talhão contém 224 árvores de um clone de *Eucalyptus sp.* Neste estudo foram utilizadas somente as duas linhas laterais contendo um total de 50 árvores, pois o povoamento é denso e não foi possível realizar o escaneamento nas demais árvores.

2.2.1 MATERIAIS

Para realização do trabalho foram utilizados os seguintes materiais:

Para varredura à Laser foi utilizada a ETR MS50. As especificações da ETR incluem: precisão angular de 1", precisão linear de 1 mm + 1,5 ppm com prisma e 2 mm + 2 ppm sem prisma e possuem diversas aplicações, incluindo o escaneamento tridimensional, medições de posição direta e inversa, locação, conectividade com receptores GNSS, reconhecimento automático de prismas e compensadores de erros. Além do mais, o equipamento possui recursos que permitem corrigir o erro de índice vertical, erro de colimação, erro de índice do compensador e inclinação do eixo secundário.

Para o levantamento geodésico foi utilizado o GNSS Hiper V RTK. Esse receptor possui rastreamento de 226 canais das constelações GPS e GLONASS de dupla frequência. Usando somente L1 o erro horizontal é de 3 mm + 0,8 ppm e erro vertical de 4 mm + 1 ppm; usando L1 e L2 no modo estático erro horizontal é de 3 mm 0,1 ppm e erro vertical de 3,5 mm + 0,4 ppm; usando L1 e L2 no modo cinemático em tempo real, o erro horizontal é de 10 mm + 1 ppm e erro vertical de 15 mm + 1 ppm.

Para a mensuração das alturas das árvores foi utilizada uma trena de 50 metros e uma fita milimetrada de 3 metros para mensuração da circunferência.

2.3 Levantamento de campo

2.3.1 CUBAGEM RIGOROSA

Inicialmente, foram feitas marcações nas 50 árvores (25 árvores na linha 1 e 25 árvores na linha 2) das linhas mais externas do plantio (Figura 3), utilizando giz branco e uma trena, nas seguintes alturas: 0,5 m; 1,0 m; 1,3 m; 1,5 m; 2,0 m; 2,5 m; 3,0 m; 3,5 m; 4,0 m; 4,5 m e 5,0 m. Posteriormente, com o auxílio de uma fita métrica milimetrada, foram medidas as circunferências nessas alturas. A cubagem rigorosa foi realizada até a altura de 5,0 m devido à impossibilidade operacional de efetuar medições acima desta altura com as árvores em pé.

Figura 3 – Foto da cubagem rigorosa das árvores em pé.



Fonte: Os autores (2024).

As mensurações de circunferência registradas em caderneta foram inseridas em uma planilha eletrônica e realizados os cálculos de transformação de circunferência para diâmetro, conforme Eq. (1) e, para cada seção, foi calculada a área seccionada, conforme Eq. (2), admitindo que a área seccionada fosse um círculo, seguidos do cálculo de volume das seções utilizando a fórmula de Smalian, segundo Eq. (3). Em seguida, os volumes das seções foram somados para obter o volume de madeira até 5 metros de altura, para posterior comparação entre os métodos de cubagem rigorosa e ETR.

$$d_i = \frac{c_i}{\pi} \quad (1)$$

$$g_i = \frac{\pi d_i^2}{40000} \quad (2)$$

$$Vh = \left(\frac{g_1 + g_2}{2} \right) L \quad (3)$$

sendo d_i o Diâmetro à altura i ao longo do tronco, em centímetros, c_i a circunferência à altura i ao longo do tronco, em centímetros, g_i a área seccionada à altura i ao longo do tronco, em metros quadrados, L o comprimento da seção, em metros.

2.3.2 LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO

O receptor GNSS foi utilizado para a coleta de coordenadas no sistema Universal Transverso de Mercator (UTM). Essas coordenadas serviram como suporte para o ajuste de poligonais abertas e para o georreferenciamento das nuvens de pontos no Sistema Geodésico Brasileiro.

A Estação Total Robótica (ETR) utilizada neste estudo foi a MS50, com especificações de alta precisão angular de 1", precisão linear de 1 mm + 1,5 ppm com prisma e 2 mm + 2 ppm sem prisma, além de funcionalidades como correção de erros sistemáticos e escaneamento tridimensional. Conforme ilustrado na Figura 4, a poligonal aberta foi adotada para garantir que o equipamento mantivesse a calibração interna durante todo o processo de coleta de dados, minimizando erros acumulados. Os pontos de apoio foram posicionados estrategicamente para maximizar a cobertura das bordas do talhão e garantir a obtenção de nuvens de pontos de alta qualidade.

Figura 4 – Planejamento da poligonal aberta.



Fonte: Os autores (2024).

A distância entre as linhas e entre as árvores são densos (0,8 m entre árvores e 2,5 m entre linhas) e por isso não favoreceu o escaneamento, uma vez que a ETR possui uma restrição na qual não é capaz de obter coordenadas tridimensionais para distâncias menores que 1,5 metros a partir do sensor, por isso somente as linhas de bordas foram escaneadas. A escolha de não realizar varreduras adicionais dentro do povoamento deveu-se à limitação do espaçamento entre árvores (0,8 m) e entre linhas (2,5 m), que dificultaria a captura de dados sem sobreposição significativa ou oclusão causada pelos galhos e copas. Além disso, a restrição da ETR em captar dados tridimensionais a uma distância mínima de 1,5 m inviabilizou medições precisas em algumas posições internas. Essa decisão visou assegurar a qualidade e confiabilidade dos dados capturados, evitando comprometimento dos resultados pela elevada densidade do povoamento e pelas características estruturais do talhão. Para estudos futuros, recomenda-se explorar métodos de escaneamento híbridos ou sensores adicionais que possam superar essas limitações.

Foram realizados escaneamentos tridimensionais em cada ponto de apoio, com uma área definida do escaneamento em direção às árvores (Figura 4), mantendo um espaçamento entre os pontos da nuvem de pontos de 1 centímetro na horizontal e 3 centímetros na vertical. É importante ressaltar que na linha 2 foram feitos somente 4 pontos de apoio, devido ao espaçamento diferente entre as árvores desta linha em comparação com a linha 1.

2.4 Processamento dos dados

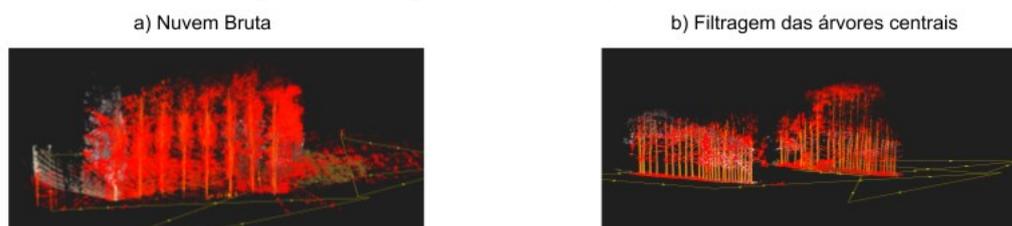
2.4.1 PROCESSAMENTO DA ETR

O processamento das nuvens de pontos obtidas pelo *Laser Scanner Terrestre* foi conduzido utilizando o *software Leica Infinity*. Foram aplicados filtros manuais para remoção de pontos que representavam galhos e copas das árvores, focando-se exclusivamente no tronco. A geração da superfície TIN (*Triangulated Irregular Network*) foi realizada para calcular os volumes de madeira, utilizando a função '*Stockpile*' do software. Este procedimento garantiu uma representação precisa da geometria do fuste, permitindo uma análise detalhada e comparativa com os métodos de cubagem rigorosa.

Foram adotadas duas técnicas para o cálculo do volume madeireiro. Sendo a primeira utilizando uma superfície TIN em torno na árvore, e a segunda, utilizando medição de distância entre pontos do fuste na nuvem de pontos bruta.

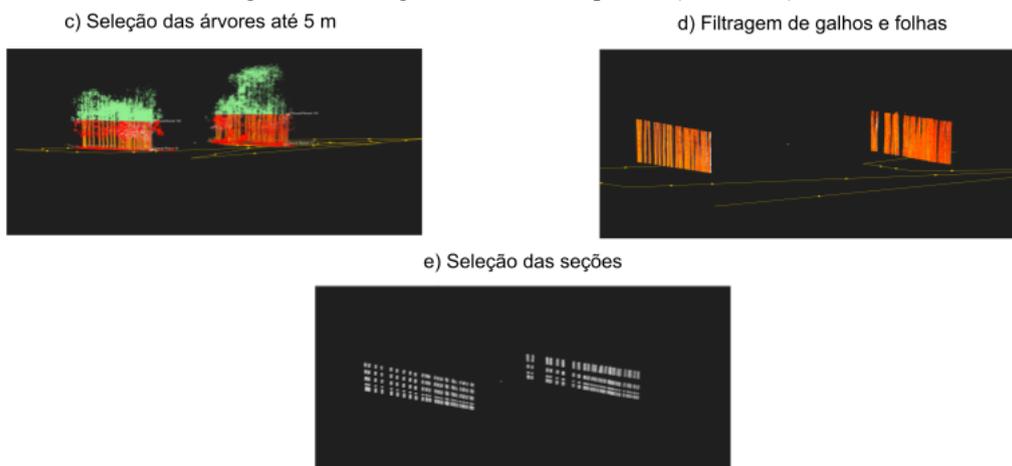
Os processos de filtragem das nuvens de pontos (Figura 5) foram realizados por meio do *software Leica Infinity*. Isso foi feito através da seleção e exclusão manual de todos os pontos que representam os galhos e as copas das árvores. Especificamente para este estudo, o processo de filtragem manual foi realizado com o objetivo de remover pontos da nuvem que representavam galhos e copas das árvores, concentrando-se exclusivamente no tronco. Esse procedimento foi conduzido por meio de uma seleção manual cuidadosa, assegurando que apenas os pontos correspondentes ao fuste fossem incluídos na análise. A filtragem foi essencial para minimizar interferências que poderiam comprometer a precisão dos modelos volumétricos gerados.

Figura 5 – Filtragem da nuvem de pontos (continua).



Fonte: Os autores (2024).

Figura 5 – Filtragem da nuvem de pontos (conclusão).



Fonte: Os autores (2024).

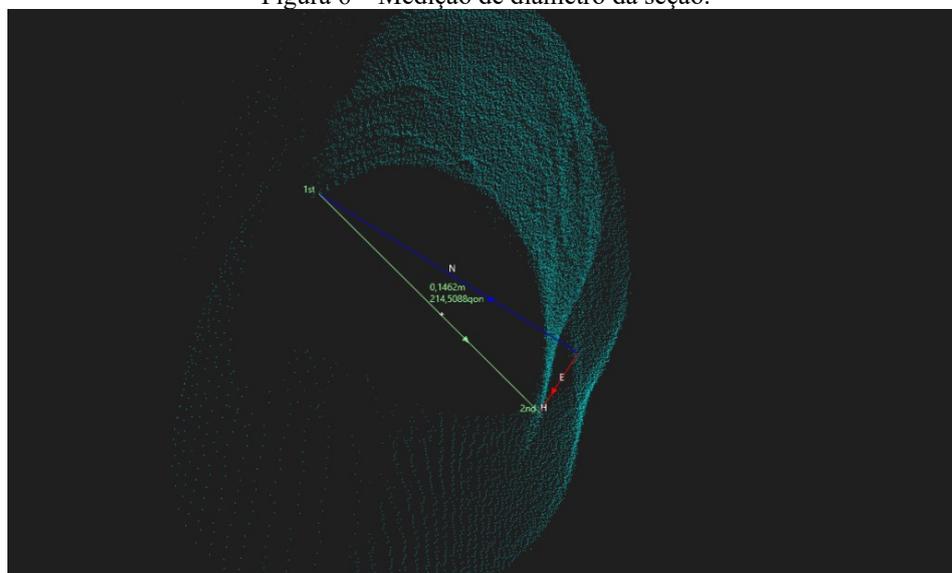
Após a seleção dos pontos que representam o fuste, foi gerado uma superfície utilizando uma rede irregular triangular (TIN - *Triangulated Irregular Network*). Na etapa de criação da superfície TIN (*Triangulated Irregular Network*), utilizou-se a configuração padrão do software, sem a aplicação de parâmetros adicionais. A escolha por um TIN padrão deve-se à simplicidade e replicabilidade do método, assegurando que a geometria do fuste fosse representada de maneira fiel. Entretanto, futuros estudos poderiam explorar a influência de diferentes configurações de parâmetros na qualidade das estimativas de volume, especialmente em cenários com maior variabilidade estrutural nas árvores. Os cálculos dos volumes de madeira foram realizados utilizando a função "*Stockpile*" do *software Leica Infinity*. Essa função é capaz de calcular o volume de pilhas, desde que a superfície esteja modelada de forma.

Em seguida, foram conduzidas análises estatísticas para avaliar a acurácia, precisão e correlação dos volumes obtidos em comparação com os volumes medidos por meio da cubagem rigorosa. Isso permite avaliar a precisão e exatidão do método proposto, fornecendo uma compreensão mais clara da validade e confiabilidade dos volumes de madeira obtidos.

Para a mensuração dos diâmetros com base nas nuvens de pontos, foram realizadas medições de diâmetros ao longo do fuste na nuvem de pontos (Figura 6) utilizando a ferramenta *Measure Point to Point* do *Software Leica Infinity*. As medições foram feitas nas mesmas alturas da Cubagem Rigorosa.

Posteriormente, foi realizado o cálculo de volume das seções utilizando a fórmula de Smalian, conforme evidenciado na Eq. (3). Após, foram feitas análises estatísticas para comparar os diâmetros obtidos através deste método com os diâmetros medidos por cubagem rigorosa.

Figura 6 – Medição de diâmetro da seção.



Fonte: Os autores (2024).

2.5 Análise dos dados

Foram realizadas análises estatísticas de RMSE (root mean square error), conforme mostra a Eq. (4), RMSE%, segundo Eq. (5) e correlação de Pearson, Eq. (6), de Volume e Diâmetro. A cubagem rigorosa, sendo uma técnica clássica e comprovadamente eficaz em trabalhos anteriores em relação ao método da Xilometria, foi considerada como o volume madeireiro real e as medições de diâmetros em campo, foi tomada como a medida real para diâmetro real.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_{predito_i} - V_{real_i})^2}{n}} \tag{4}$$

$$RMSE\% = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_{predito_i} - V_{real_i})^2}{n}}}{\sum_{i=1}^n V_{real_i}} * n * 100 \tag{5}$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (V_{predito_i} - \bar{V}_{predito})(V_{real_i} - \bar{V}_{real})}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n (V_{predito_i} - \bar{V}_{predito})^2)(\sum_{i=1}^n (V_{real_i} - \bar{V}_{real})^2)}} \tag{6}$$

sendo $V_{predito}$ o volume calculado pela nuvem de pontos e V_{real} o volume calculado pela formula de Smalian. As mesmas equações serão utilizadas para o diâmetro, ou seja, o “predito” é o diâmetro derivado da nuvem de pontos e o “real” é o diâmetro medido em campo. O valor de n é o número de árvores (50 árvores). E r o valor da correlação de Pearson.

3 RESULTADOS

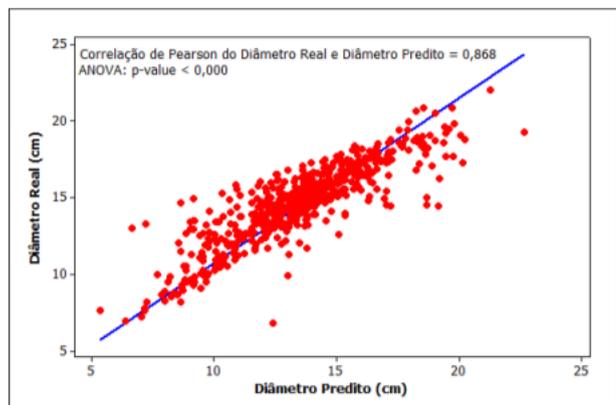
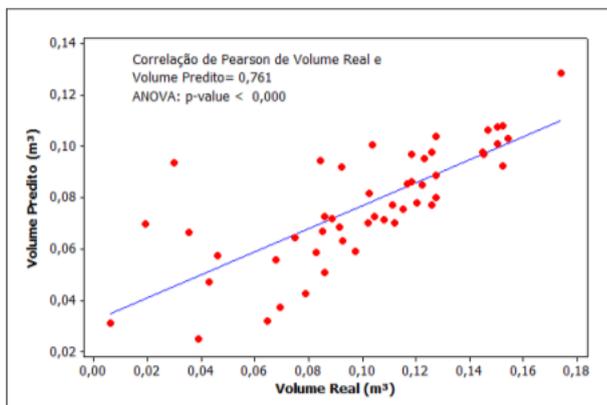
3.1 Correlação

A Figura 7 exibe os gráficos de correlação que ilustram a relação entre os volumes de madeira e os diâmetros medidos utilizando a ETR e os volumes e diâmetros obtidos por métodos de cubagem rigorosa.

Figura 7 – Gráfico de Correlação.

a) Volume Real x Volume Predito

b) Diâmetro Predito x Diâmetro Real

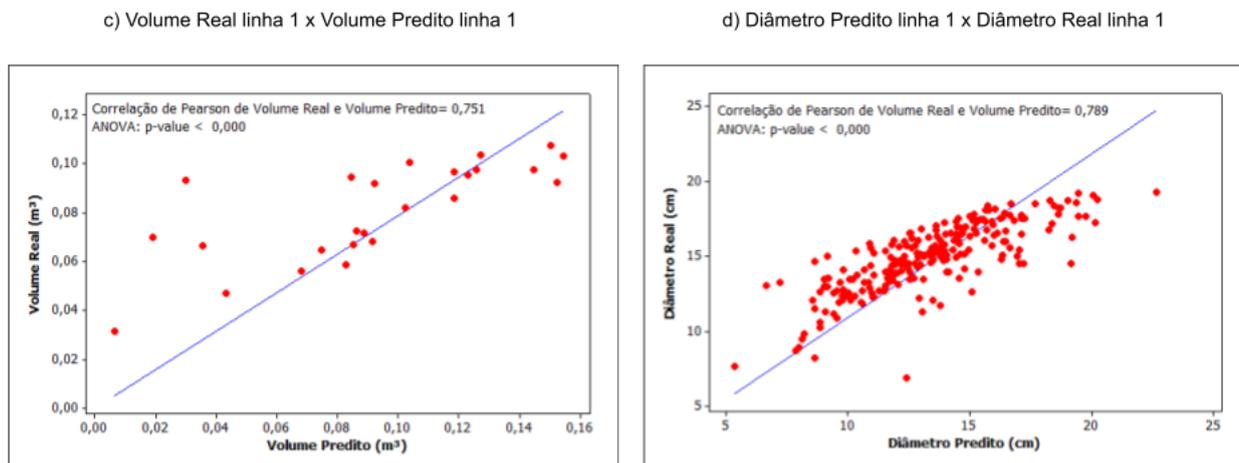


Fonte: Os autores (2024).

Os gráficos (Figura 7a e 7b) apresentam que houve correlação positiva entre as variáveis analisadas, com coeficientes de 0,761 para o volume de madeira e 0,868 para o diâmetro, indicando uma relação forte entre os dados coletados pelos dois métodos. Além disso, o teste de ANOVA demonstrou um valor de p (p-value) inferior a 0,05, indicando que, com um nível de confiança de 95%, o volume madeireiro e diâmetro obtido pela ETR (volume predito e diâmetro predito) são estatisticamente equivalentes ao volume e diâmetro real.

A Figura 8 exibe gráficos de correlação da linha 1 que ilustram a relação entre os volumes de madeira e os diâmetros medidos utilizando a ETR e os volumes e diâmetros obtidos por métodos de cubagem rigorosa.

Figura 8 – Gráfico de correlação da linha 1.

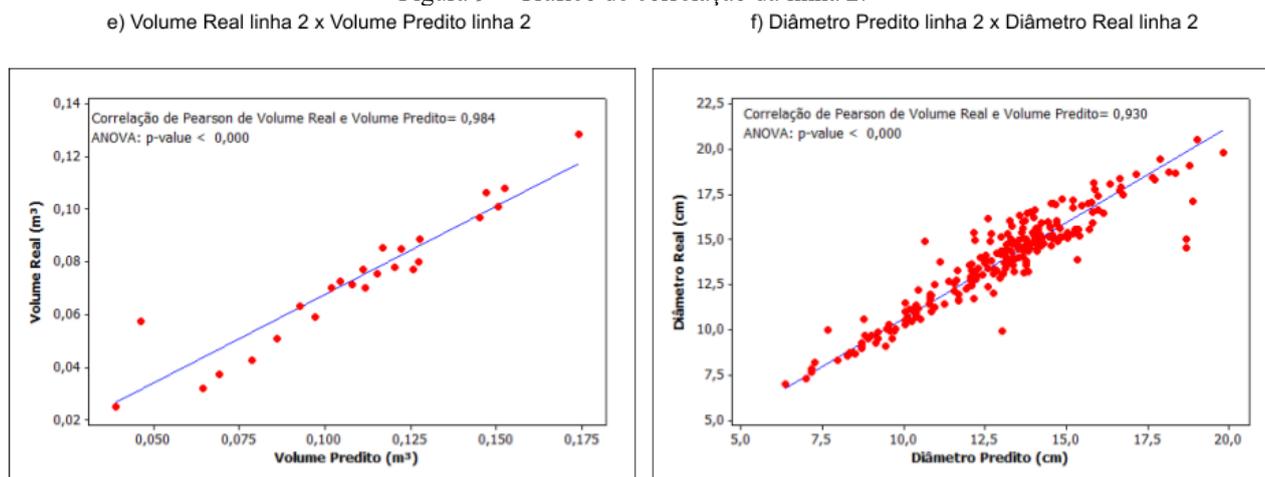


Fonte: Os autores (2024).

Os gráficos (Figura 8c e 8d) apresentam que houve correlação positiva entre as variáveis analisadas, com coeficientes de 0,751 para o volume de madeira da linha 1 e 0,789 para o diâmetro da linha 1, indicando uma relação forte entre os dados coletados pelos dois métodos.

A Figura 9 exibe gráficos de correlação da linha 2 que ilustram a relação entre os volumes de madeira e os diâmetros medidos utilizando a ETR e os volumes e diâmetros obtidos por métodos de cubagem rigorosa.

Figura 9 – Gráfico de correlação da linha 2.



Fonte: Os autores (2024).

Os gráficos (Figura 9e e 9f) apresentam que houve correlação positiva entre as variáveis analisadas, com coeficientes de 0,984 para o volume de madeira da linha 2 e 0,930 para o diâmetro da linha 2, indicando uma relação fortíssima entre os dados coletados pelos dois métodos. Além disso, o teste de ANOVA demonstrou um valor de p (p-value) inferior a 0,05 para ambas as linhas, indicando que, com um nível de confiança de 95%, o volume madeireiro e diâmetro obtido pela ETR (volume predito e diâmetro predito) são estatisticamente equivalentes ao volume e diâmetro real para as linhas 1 e 2.

3.2 RMSE e RMSE% de volume

A Tabela 1 apresenta os valores de RMSE (Root Mean Square Error) e RMSE% para os volumes obtidos através de dois métodos: cubagem rigorosa (volume real) e o volume estimado pelo método robótico utilizando a Estação Total Robótica (ETR) em ambas as linhas avaliadas (Linha 1 e Linha 2).

Tabela 1 – Análise de RMSE e RMSE% entre Volume Real e Volume Predito em m³.

Estatística	Ambas as linhas	Linha 1	Linha 2
RMSE	0,0254	0,03162	0,0201
RMSE%	32,9701%	37,6692%	23,2306%

Fonte: Os Autores (2023).

Foram obtidos valores inferiores a 33% para ambas as linhas. Destaca-se que foi observado que a linha 2 apresentou menor erro quando comparado com a linha 1. Observa-se que a Linha 2 apresentou um RMSE menor (0,0201 m³) em comparação com a Linha 1 (0,03162 m³), indicando que as estimativas para a Linha 2 foram mais próximas do valor real. Novamente, a Linha 2 se destaca por ter um RMSE% menor (23,2306%) em comparação com a Linha 1 (37,6692%), sugerindo que as estimativas na Linha 2 são relativamente mais precisas do que na Linha 1.

3.3 RMSE e RMSE% de diâmetro

3.3.1 LINHA 1 E 2

A Tabela 2 fornece uma análise detalhada dos erros associados às medições de diâmetro ao longo do fuste das árvores na Linha 1, comparando os valores reais obtidos por cubagem rigorosa com os valores estimados pela análise da nuvem de pontos.

Tabela 2 – Análise de RMSE e RMSE% entre Diâmetro Real e Diâmetro Predito em cm.

Seção	RMSE	RMSE%
0,5 m	1,585	8,83%
1,0 m	1,044	6,12%
1,3 m	1,543	9,15%
1,5 m	1,777	10,75%
2,0 m	2,100	13,02%
2,5 m	2,232	14,23%
3,0 m	2,828	18,52%
3,5 m	2,849	19,13%
4,0 m	3,313	22,95%
4,5 m	3,374	23,90%
5,0 m	2,496	18,24%

Fonte: Os Autores (2023).

A Tabela 2 mostra que o erro aumenta progressivamente à medida que a altura ao longo do tronco aumenta, com um RMSE menor nas seções mais baixas (1,044 cm a 1 metro) e um RMSE maior nas seções mais altas (3,3749 cm a 4,5 metros). Este padrão indica que a acurácia das medições diminui em alturas maiores. Similarmente ao RMSE, o RMSE% também aumenta com a altura, variando de 8,83% a 0,5 metro para 23,90% a 4,5 metros. Isso indica que o método robótico é mais confiável para estimativas de diâmetro em alturas mais baixas e menos preciso para alturas maiores.

A Tabela 3 segue o mesmo formato da Tabela 2, mas apresenta a análise dos diâmetros medidos na Linha 2. Os resultados são comparados com os valores reais obtidos por cubagem rigorosa.

Tabela 3 – Análise de RMSE e RMSE% entre Diâmetro Real e Diâmetro Predito em cm.

Seção	RMSE	RMSE%
0,5 m	0,834	5,00%
1,0 m	0,798	4,98%
1,3 m	1,017	6,46%
1,5 m	1,064	6,84%
2,0 m	1,025	6,74%
2,5 m	1,012	6,78%
3,0 m	1,103	7,50%
3,5 m	1,112	7,81%
4,0 m	1,198	8,64%
4,5 m	1,198	8,87%
5,0 m	1,403	10,57%

Fonte: Os Autores (2023).

De maneira similar à Tabela 2, o RMSE aumenta com a altura, variando de 0,798 cm a 1 metro para 1,403 cm a 5,0 metros. Contudo, os valores de RMSE na Linha 2 são, em geral, mais baixos do que os observados na Linha 1, sugerindo maior acurácia nas medições da Linha 2. O RMSE% na Linha 2 também é menor em comparação com a Linha 1, variando em 4,98% a 1 metro e aumentando para 10,57% a 5,0 metros. Esses valores sugerem que a Linha 2 apresenta uma performance superior na estimativa de diâmetros ao longo do fuste.

4 DISCUSSÃO

Os gráficos da Figura 7 demonstraram que, embora haja uma correspondência razoável entre os métodos, existe uma dispersão nos pontos, especialmente para valores extremos, sugerindo que, embora a tecnologia *lidar* acoplada à ETR seja eficaz, ainda há variações e possíveis imprecisões em comparação com a cubagem rigorosa, especialmente em condições mais complexas ou em seções mais altas do fuste. Esses resultados reforçam a validade do uso da ETR para medições indiretas, mas também indicam a necessidade de melhorias e ajustes para aumentar a acurácia e reduzir as diferenças observadas nos gráficos de correlação.

Os gráficos das Figuras 8 e 9 ilustram a correlação entre volume e diâmetro real, bem como entre volume e diâmetro predito. Esses resultados demonstram que a correlação de Pearson foi maior na Linha 2 em comparação à Linha 1. Esse comportamento pode ser atribuído à diferença no espaçamento entre as árvores nas duas linhas, sendo o espaçamento na Linha 1 distinto daquele observado na Linha 2.

Os diâmetros estimados pelo processamento da nuvem de pontos representam melhor o fuste do que medições convencionais realizadas com paquímetro ou fita métrica (Saarinen et al., 2017). Isso porque os métodos convencionais de cubagem rigorosa não consideram a geometria do fuste, mas sim sólidos de revolução que se aproximam do formato das árvores (Machado & Figueiredo Filho, 2006 citado por Buck et al., 2019).

No geral, os resultados de RMSE e RMSE% indicaram que, embora ambos os métodos apresentem um nível aceitável de precisão, a Linha 2 apresentou uma melhor performance, com menores erros absolutos e percentuais. Vários fatores podem ter contribuído para a melhor performance da Linha 2 em relação à Linha 1, resultando em menores erros absolutos e percentuais nos cálculos de volume e medições de diâmetro. Para tanto, deve-se destacar possíveis causas observadas em campo.

A diferença na densidade de povoamento, neste caso, a linha 2 tinha uma menor densidade de árvores e um arranjo mais espaçado entre as árvores, o que facilitou o escaneamento e a obtenção de dados tridimensionais mais precisos. Assim, menores interferências entre árvores resultaram em nuvens de pontos mais limpas e menos sobrepostas, permitindo medições mais precisas, ou seja, a densidade menor e a ausência de obstáculos como galhos entrelaçados proporcionou melhores condições de visibilidade para o sensor *LiDAR*, garantindo que mais pontos de medição fossem capturados com precisão.

A disposição e o posicionamento dos pontos de apoio na Linha 2 também podem ter sido mais adequados, resultando em um melhor alinhamento das medições e menores distorções nas nuvens de pontos. Como observado em campo, isso pode ter ajudado a minimizar erros geométricos que, de outra forma, poderiam ter ocorrido durante o escaneamento. Vale ressaltar também, que na Linha 2, os pontos de apoio permitiram uma visão mais horizontal (menor ângulo vertical) do fuste das árvores, o que é geralmente

associado a uma maior precisão nas medições feitas com a ETR. Ângulos mais agudos, como os usados na Linha 1, foram mais suscetíveis a erros de paralaxe e outras distorções geométricas.

Ainda, de acordo com Faggion (2006), um erro na linha de visada refere-se ao desvio na ortogonalidade entre os eixos secundário, principal e de colimação. Foi confirmado que visadas em ângulos verticais superiores a 45° podem afetar o ângulo horizontal em cerca de 24,8". Os escaneamentos realizados nas Linhas 1 e 2 apresentaram visadas com ângulos verticais maiores que 45°, aproximando-se de 90° na Linha 1.

O RMSE% do diâmetro a 1,30 m na Linha 1 e Linha 2 foi inferior a 10%, sugerindo que a ETR realiza medições precisas com um nível de acurácia de 10% em relação ao DAP. Isso está alinhado com a observação de Faggion (2006), uma vez que a ETR é geralmente posicionada a uma altura de 1,3 a 1,7 metros, mantendo o ângulo vertical próximo ao horizonte, onde o erro de colimação é menor.

Conforme demonstrado nas Tabelas 2 e 3, ficou evidente que as medições de diâmetro ao longo do fuste possuem uma acurácia superior nas partes inferiores, com uma diminuição da acurácia conforme as seções tornam-se mais altas. Esses resultados destacam a variação na acurácia das medições de diâmetro ao longo do fuste, sugerindo que o método pode ser particularmente útil para medições em alturas mais próximas ao solo, mas enfrenta desafios em alturas mais elevadas. Os problemas relacionados a perda de acurácia nas regiões mais altas estão relacionados a fatores ambientais, bióticos e geométricos da própria floresta.

Nos dias 14 e 15 de abril de 2023, quando foram realizados os levantamentos em campo com a ETR, foi observada uma considerável movimentação da copa das árvores devido ao vento. Esta movimentação das árvores resultou em superfícies menos precisas geradas pelo *Software Leica Infinity* (Figura 6), sendo mais um fator que contribuiu para o alto RMSE.

Para Liang et al. (2016), laser scanner terrestre pode ser colocado em prática nos inventários florestais pois, os processos operacionais da ETR podem ser realizados de forma interativa, como processos automatização de mapeamento das árvores, modelagem tridimensional e extração de variáveis dendrométricas. Os autores complementam que dados de nuvem de pontos podem ser altamente valiosas para operações silviculturais, pois esses dados oferecem detalhes que não são fornecidos por ferramentas automatizadas.

Em relação a fatores bióticos, outro fator que influenciou a imprecisão dos diâmetros em seções mais altas foi a oclusão da nuvem de pontos por árvores e galhos, devido à densidade de galhos excessiva da floresta. Isso causou o bloqueio da visada da ETR, resultando em imprecisões no método. Além do mais, nestas alturas mais elevadas, a iluminação solar influenciou a capacidade do sensor LiDAR de captar reflexos precisos. Conforme análise da nuvem de pontos, reflexões excessivas e sombras projetadas por galhos interferiram na coleta de dados, resultando em medições menos precisas em alturas superiores.

Como mostrado por Buck et al. (2019), a oclusão de pontos impediu a obtenção do volume total do tronco, sugerindo que a cobertura seja total na superfície do tronco para aumentar as estimativas do volume. Ele também mostrou que métodos convencionais e por TIN, conforme a altura da árvore aumenta o erro do volume estimado também aumenta.

De forma geral os volumes de uma espécie são calculados utilizando variáveis dendrométricas como altura e DAP (Gatziolis et al., 2010 citado por Silva et al., 2013) e são ajustados em modelos de equações onde essas variáveis são de difíceis aquisições, utilizando por vezes métodos destrutivos (derrubada da árvore) para a coleta. Por isso o laser scanner terrestre mostra-se como uma ferramenta de grande valia para determinação de volume com acuracidade (Silva et al., 2013).

5 CONCLUSÃO

Com base no exposto, conclui-se que a Estação Total Robótica (ETR) é capaz de realizar medições de diâmetro à altura de 1,30 m (DAP) com uma precisão inferior a 10% em comparação com medições diretas (Cubagem Rigorosa).

Fatores como o vento exercem uma influência direta na qualidade da nuvem de pontos obtida pela ETR, causando imprecisões no método. Ângulos muito próximos do Zênite ou Nadir do equipamento também introduzem erros nas medições indiretas. Além disso, distâncias muito longas também afetam o método de obtenção de medidas indiretas.

Apesar de todo o levantamento em campo ter sido realizado em um período de 9 horas, caso algum

trabalho futuro exija apenas o DAP, a ETR demonstra uma precisão que permite um levantamento em menos tempo em comparação com técnicas de medições diretas, como fitas e sutas.

Para trabalhos futuros, recomenda-se que os escaneamentos a laser não apresentem uma elevação do ângulo vertical tão abrupta, que as distâncias entre a ETR e o alvo sejam menores, e que o projeto inclua mais pontos de controle para diferentes ângulos de escaneamento do fuste. Além disso, é importante monitorar melhor o vento, que foi um fator significativo contribuinte para o erro, sugerindo a realização dos escaneamentos em dia com menos vento.

Além do mais, deve-se avaliar a aplicação de algoritmos que filtrem automaticamente os ruídos presentes nas nuvens de pontos, como os causados por galhos, copas ou reflexos espúrios, pode melhorar significativamente a precisão da modelagem do fuste. Métodos baseados em aprendizado de máquina, como redes neurais treinadas para segmentação de fustes, ou algoritmos como RANSAC ajustados para estruturas cilíndricas, podem ser particularmente úteis. Investir na automatização das etapas realizadas manualmente, como a filtragem de pontos indesejados e a geração da superfície TIN, pode aumentar a eficiência e a replicabilidade do método. Ferramentas de programação e processamento em softwares especializados, como scripts em Python ou MATLAB, poderiam ser integradas ao fluxo de trabalho.

Por fim, é importante ressaltar que este estudo utilizou uma Estação Total Robótica com aplicação de Laser Scanner, a qual possui limitações quando comparada com Laser Scanners Terrestres apropriados para escaneamentos precisos.

Agradecimentos

À Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e ao Laboratório de Topografia e Geodésia pela disponibilização dos equipamentos e softwares utilizados.

Contribuição dos Autores

J.V.N. Lima.: aquisição de dados, conceituação e escrita – primeira redação. A.A.V. Soares.: conceituação e revisão. M.S. Pacheco.: aquisição de dados e conceituação. G.D. Martins.: conceituação, revisão e escrita.

Conflitos de Interesse

Os autores declaram não haver conflito de interesse.

Referências

- Almeida, G. J. F. D. (2018). *Uso do laser scanner terrestre na estimativa de parâmetros biométricos em povoamentos florestais* [Mestrado em Recursos Florestais, Universidade de São Paulo]. <https://doi.org/10.11606/D.11.2018.tde-02032018-094924>
- Buck, A. L. B., Lingnau, C., Péllico Neto, S., Machado, Á. M. L., & Martins-Neto, R. P. (2019). Stem Modelling of Eucalyptus by Terrestrial Laser Scanning. *Floresta e Ambiente*, 26, e20160125. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.012516>
- Buck, A. L. B., Silva, M. N., Lingnau, C., Machado, Á. M. L., Neto, R. P. M., & Pesck, V. A. (2012). Avaliação da modelagem tridimensional do tronco de *Pinus elliottii* a partir de dados laser terrestre Evaluation of three-dimensional trunk modeling of *Pinus elliottii* from terrestrial laser data. *AMBIÊNCIA*, 8(4), Artigo 4.
- FAGGION, P. L. (2006). *Considerações sobre a instrumentação topográfica*. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Departamento de Geomática
- Florian, E. P. (2021). *Dendrometria*. Universidade Federal de Alagoas. <http://www.repositorio.ufal.br/jspui/handle/123456789/13967>

- Fonseca, A. L. B. (2018). *Estimação de volume de madeira em povoamento de eucalipto utilizando dados de Laser Scanner Terrestre*. <https://locus.ufv.br/handle/123456789/27647>
- Gruber, T., & Willberg, M. (2019). Signal and error assessment of GOCE-based high resolution gravity field models. *Journal of Geodetic Science*, 9(1), 71–86. <https://doi.org/10.1515/jogs-2019-0008>
- Liang, X., Kankare, V., Hyypä, J., Wang, Y., Kukko, A., Haggrén, H., Yu, X., Kaartinen, H., Jaakkola, A., Guan, F., Holopainen, M., & 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>
- Lima, G. C. P., Kohler, S. V., Silvestre, R., Navroski, M. C., Bonazza, M., Allegretti, G., & Scarioti, R. (2016). ACURACIDADE DE MÉTODOS DE CUBAGEM PARA ESTIMATIVA DO VOLUME DE Pinus taeda L. *BIOFIX Scientific Journal*, 1(1). https://www.researchgate.net/profile/Marcelo-Bonazza/publication/312542839_ACURACIDADE_DE_METODOS_DE_CUBAGEM_PARA_ESTIMATIVA_DO_VOLUME_DE_Pinus_taeda_L/links/59a40e79a6fdcc490a476288/ACURACIDADE-DE-METODOS-DE-CUBAGEM-PARA-ESTIMATIVA-DO-VOLUME-DE-Pinus-taeda-L.pdf
- Lima, J. V. do N. (2023). *Cálculo de volume madeireiro de eucalyptus a partir de estação total robótica com aplicação de laser scanner terrestre*. <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/38328>
- Lingnau, C., Silva, M. N., Santos, D. S. dos, Machado, Á., & Lima, J. G. dos S. (2008). Mensuração de alturas de árvores individuais a partir de dados laser terrestre Individual tree height mensuration with laser terrestrial data. *AMBIÊNCIA*, 4(4), Artigo 4.
- Martins Neto, R. P., Buck, A. L. B., Silva, M. N., Christel, L., Machado, Á. M. L., & Pesck, V. A. (2013). Avaliação da varredura laser terrestre em diferentes distâncias da árvore para mensurar variáveis dendrométricas. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 19(3), 420–433. <https://doi.org/10.1590/S1982-21702013000300005>
- Saarinen, N., Kankare, V., Vastaranta, M., Luoma, V., Pyörälä, J., Tanhuanpää, T., Liang, X., Kaartinen, H., Kukko, A., Jaakkola, A., Yu, X., Holopainen, M., & Hyypä, J. (2017). Feasibility of Terrestrial laser scanning for collecting stem volume information from single trees. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 123, 140–158. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.11.012>
- Silva, M., Buck, A., Lingnau, C., Machado, A., Pereira Martins-Neto, R., & Pesck, V. (2013). Terrestrial Laser Scanner for Forestry Measurements – Principles and Applications. 1143-1152.
- Sobrinho, M., Corte, A., Vasconcellos, B., Sanquetta, C., & Rex, F. (2018). USO DE VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS (VANT) PARA MENSURAÇÃO DE PROCESSOS FLORESTAIS. *Enciclopédia Biosfera*, 15(27), 117–129. https://doi.org/10.18677/EnciBio_2018A80

Biografia do Autor Principal



João Victor do Nascimento Lima, natural de Rio Branco – Acre, nascido em 2001. Graduado em Engenharia de Agrimensura e Cartográfica pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU), mestrando do Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Informações Geoespaciais (PPGAIG) da UFU. Tem atuado nas seguintes especialidades: sensoriamento remoto aplicado à silvicultura de precisão, agricultura de precisão e manejo florestal.



Esta obra está licenciada com uma Licença [Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.