

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA FLORESTAL
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

LARISSA MARIA LOPES SANTANA

ESTIMATIVA DE VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS A
PARTIR DO SENSOR LiDAR NO IPHONE 13 PRO

RECIFE-PE

2024

LARISSA MARIA LOPES SANTANA

**ESTIMATIVA DE VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS A
PARTIR DO SENSOR LiDAR NO IPHONE 13 PRO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Engenharia Florestal
da Universidade Federal Rural de Pernambuco
como parte das exigências para obtenção do
Título de Bacharel em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Emanuel Araújo Silva

RECIFE-PE

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S232e Santana, Larissa Maria Lopes
 Estimativa de variáveis dendrométricas a partir do sensor LiDAR no Iphone 13 Pro / Larissa Maria Lopes
Santana. - 2024.
 43 f. : il.

 Orientador: Emanuel Araujo Silva.
 Inclui referências.

 Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Bacharelado
 em Engenharia Florestal, Recife, 2024.

 1. altura. 2. Arboreal Tree. 3. diâmetro. 4. FlorestScanner. 5. IOS. I. Silva, Emanuel Araujo, orient. II. Título

CDD 634.9

LARISSA MARIA LOPES SANTANA

**ESTIMATIVA DE VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS A
PARTIR DO SENSOR LiDAR NO IPHONE 13 PRO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Engenharia Florestal
da Universidade Federal Rural de Pernambuco
como parte das exigências para obtenção do
Título de Bacharel em Engenharia Florestal.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Emanuel Araújo Silva - UFRPE/DCFL
Orientador

Prof. Dr. Rinaldo Luiz Caraciolo Ferreira - UFRPE/DCFL
Examinador

Prof. Dr. Gabriel Paes Marangon - UNIPAMPA/São Gabriel
Examinador

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo, gostaria de expressar minha gratidão a Deus que me proporcionou força e capacidade para conquistar os objetivos nessa longa jornada acadêmica, e não “me deixar cair” aos desafios que surgiram ao longo do caminho.

A Universidade Federal Rural de Pernambuco pela oportunidade de realizar o curso de Engenharia Floresta, numa instituição pública e de qualidade.

Ao meu orientador Emanuel Araújo pela paciência, comprometimento e o pelo apoio a todo momento ao longo deste trabalho. Cada mensagem de incentivo foi fundamental para este trabalho.

Aos professores do Departamento de Ciência Florestal, pelos ensinamentos que foram essenciais para o meu desenvolvimento tanto no âmbito pessoal quanto profissional.

Aos meus amigos, em especial Marcus, Jorge, Marco Túlio e Bruno por toda partilha e confiança no meu potencial quando nem eu mesma acreditava mais. Obrigado pelo apoio, compreensão, incentivo e palavras motivadoras.

Às minhas amigas da faculdade, em especial Luana Glasner, Maria Carolina, Natália Dias, Richely Silva e Samiah Lacerda, pelo apoio e risadas durante toda a graduação, tornando tudo isso mais leve.

Por fim, e não menos importante, o agradecimento mais especial aos meus pais, minhas irmãs e meu noivo, cujo sem eles nada disso seria possível. Vocês são o meu alicerce hoje e sempre, essa vitória também é de vocês. A todos vocês, meu muito obrigado!

RESUMO

Nos últimos anos, o uso de tecnologias de sensoriamento remoto, como o sensor LiDAR, tornou-se fundamental na análise de variáveis dendrométricas em áreas florestais, e o LiDAR no iPhone 13 Pro representa uma inovação, oferecendo uma maneira acessível e eficiente de obter dados precisos sobre a estrutura florestal. Este trabalho visa avaliar a eficácia do sensor LiDAR do iPhone 13 Pro na estimativa de variáveis dendrométricas, como diâmetro e altura das árvores, em um povoamento de Mogno Africano, comparando medições com métodos convencionais para verificar a precisão dos dados obtidos pelo LiDAR. A tecnologia LiDAR tem avançado significativamente, permitindo a obtenção de dados tridimensionais detalhados sobre a estrutura das florestas, sendo amplamente utilizada na engenharia florestal para inventário, planejamento de manejo e modelagem de crescimento de árvores; aplicativos que incorporam LiDAR, como ForestScanner e Arboreal Tree, têm mostrado potencial em fornecer estimativas precisas de variáveis dendrométricas. O estudo foi realizado na Estação Experimental de Cana-de-açúcar do Carpina, em Pernambuco, onde dados de diâmetro e altura foram coletados manualmente e por meio dos aplicativos ForestScanner e Arboreal Tree, utilizando o sensor LiDAR do iPhone 13 Pro, e as medições foram comparadas para avaliar a precisão dos dados obtidos pelos aplicativos em relação aos métodos convencionais. Os resultados mostraram uma forte correlação entre as medições convencionais e as obtidas pelos aplicativos, com o ForestScanner apresentando um coeficiente de determinação (R^2) de 0,852 e um RMSE de 2,24 cm para o diâmetro, enquanto o Arboreal Tree mostrou um R^2 de 0,9501 e um RMSE de 1,44 cm; para a altura, o Arboreal Tree apresentou um R^2 de 0,7857 e um RMSE de 1,31 m, indicando que ambos os aplicativos fornecem estimativas precisas e podem ser usados como alternativas eficientes aos métodos convencionais de medição. A utilização do sensor LiDAR no iPhone 13 Pro, combinada com os aplicativos ForestScanner e Arboreal Tree, mostrou-se eficaz na estimativa de variáveis dendrométricas, destacando a importância da tecnologia LiDAR em dispositivos móveis como uma ferramenta inovadora e prática para a coleta de dados florestais, oferecendo precisão, economia de tempo e custos na obtenção de informações sobre a estrutura florestal.

Palavras-chave: altura; *Arboreal Tree*; diâmetro; *ForestScanner*; IOS

ABSTRACT

In recent years, the use of remote sensing technologies, such as the LiDAR sensor, has become fundamental in the analysis of dendrometric variables in forest areas, and the LiDAR in the iPhone 13 Pro represents an innovation, offering an accessible and efficient way to obtain accurate data on forest structure. This study aims to evaluate the effectiveness of the iPhone 13 Pro's LiDAR sensor in estimating dendrometric variables, such as tree diameter and height, in an African Mahogany plantation, comparing measurements with conventional methods to verify the accuracy of the data obtained by LiDAR. LiDAR technology has advanced significantly, allowing for detailed three-dimensional data acquisition on forest structure, being widely used in forestry engineering for inventory, management planning, and tree growth modeling; applications incorporating LiDAR, such as ForestScanner and Arboreal Tree, have shown potential in providing accurate estimates of dendrometric variables. The study was conducted at the Carpina Sugarcane Experimental Station in Pernambuco, where diameter and height data were collected manually and through the ForestScanner and Arboreal Tree applications using the iPhone 13 Pro's LiDAR sensor, and the measurements were compared to assess the accuracy of the data obtained by the applications in relation to conventional methods. The results showed a strong correlation between conventional measurements and those obtained by the applications, with ForestScanner presenting a determination coefficient (R^2) of 0.852 and an RMSE of 2.24 cm for diameter, while Arboreal Tree showed an R^2 of 0.9501 and an RMSE of 1.44 cm; for height, Arboreal Tree presented an R^2 of 0.7857 and an RMSE of 1.31 m, indicating that both applications provide accurate estimates and can be used as efficient alternatives to conventional measurement methods. The use of the LiDAR sensor in the iPhone 13 Pro, combined with the ForestScanner and Arboreal Tree applications, proved to be effective in estimating dendrometric variables, highlighting the importance of LiDAR technology in mobile devices as an innovative and practical tool for forest data collection, offering precision, time savings, and cost efficiency in obtaining information about forest structure.

Keywords: height; *Arboreal Tree*; diameter; *ForestScanner*; iOS

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização geográfica do município de Carpina, estado de Pernambuco.	18
Figura 2 – Parcela de estudo na ECCAC – UFRPE e coordenadas utilizadas pelo Google Maps.	19
Figura 3 – Dimensões (a) e sensor LiDAR na câmera traseira (b) do smartphone Iphone 13 Pro.	20
Figura 4 – Imagem da leitura do diâmetro (D) do sensor LiDAR através do software <i>FlorestScanner</i>	22
Figura 5 – Planilha do software <i>ForestScanner</i> com os dados obtidos pelo sensor LiDAR. ...	22
Figura 6 – Interface da seleção das árvores para obter a leitura do diâmetro (D) e altura (H) através do software <i>Arboreal Tree</i>	24
Figura 7 – Resultado da leitura do diâmetro (D) e altura (H) do sensor LiDAR através do software <i>Arboreal Tree</i>	24
Figura 8 – Diâmetro a 1,30 m do solo (D) do <i>FlorestScanner</i> e diâmetro a 1,30 m do solo (D) manual.	29
Figura 9 – Diâmetro (D) <i>Arboreal Tree</i> e D manual.	31
Figura 10 – Altura (h) do <i>Arboreal Tree</i> e altura (H) manual.....	33
Figura 11 – Análise da precisão dos dados do software <i>Arboreal Tree</i> através da relação hipsométrica.	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo das principais informações do software <i>FlorestScanner</i>	21
Tabela 2 – Resumo das principais informações do software <i>Arboreal Tree</i>	23
Tabela 3 – Modelos hipsométricos testados.	25
Tabela 4 – Diâmetros a 1,30 m do solo (D) mensurados de forma convencional, diâmetros 1,30 m do solo (D) estimado pelos softwares <i>FlorestScanner</i> e <i>Arboreal Tree</i> e a diferença entre o D real com os softwares.	26
Tabela 5 – Alturas (H) mensuradas com Blume-Leiss, a altura (h) estimadas pelo software <i>Arboreal Tree</i> e a diferença entre H real e h <i>Arboreal Tree</i>	27
Tabela 6 – R^2_{aj} (coeficiente de determinação ajustado) dos modelos hipsométricos testados para selecionar melhor modelo.	28
Tabela 7 – Estatística descritiva e comparação dos dados de diâmetro a 1,30 m do solo (D) convencional e os softwares <i>FlorestScanner</i> e <i>Arboreal Tree</i>	32
Tabela 8 – Estatística descritiva e comparação dos dados de altura (H) convencional e a altura (h) do software <i>Arboreal Tree</i>	33

LISTA DE SIGLAS

C	Circunferência a 1,30 m do solo
D	Diâmetro a 1,30 m do solo
EECAC	Estação Experimental de Cana-de-açúcar do Carpina
H	Altura
LiDAR	Light Detection and Ranging
TLS	Laser Scanner Terrestre
RMSE	Raiz Quadrada do Erro Médio
R^2	Coeficiente de Determinação
$R^2_{aj.}$	Coeficiente de Determinação Ajustado
SIG	Sistemas de Informações Geográficas
VANT	Veículos Aéreos Não Tripulados

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS	12
2.1 Objetivo geral.....	12
2.2 Objetivos específicos.....	12
3 REVISÃO DE LITERATURA.....	13
3.1 O avanço da tecnologia LiDAR	13
3.2 Uso do senso LiDAR na Engenharia Florestal.....	14
3.3 Aperfeiçoamento de aplicativos para variáveis dendrométricas	15
3.4 O uso do Iphone para coleta de dados florestais	16
3.5 Integração de tecnologias em povoamentos de Mogno Africano (<i>Khaya ivorensis</i> A. Chev.).....	17
4 MATERIAL E MÉTODOS	18
4.1 Caracterização da área de estudo	18
4.2 Coleta de dados	18
4.2.1 Equipamentos utilizados.....	19
a) Equipamentos convencionais para mensuração florestal.....	20
b) Smartphone Iphone 13 Pro	20
4.2.2 Softwares	21
a) ForestScanner	21
b) Arboreal Tree	23
4.2.3 Variáveis analisadas	25
a) Altura (H).....	25
b) Diâmetro a 1,30 m do solo (D).....	25
4.2.4 Modelos Estatísticos	25
4.3 Processamento dos dados.....	26
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
5.1 Precisão das estimativas com o sensor LiDAR no Iphone 13 Pro	29
5.1.1 Relação do diâmetro convencional com o diâmetro do software FlorestScanner e Arboreal Tree.....	29
5.1.2 Relação da altura convencional com a altura do software Arboreal Tree	32
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	37
REFERÊNCIAS	38

1 INTRODUÇÃO

A utilização de tecnologias avançadas no campo da engenharia florestal tem se mostrado essencial para o desenvolvimento de métodos mais eficientes e precisos na coleta de dados. Entre essas inovações, destaca-se o uso da tecnologia do sensor LiDAR (*Light Detection and Ranging*), que, através de pulsos de laser, permite a obtenção de informações tridimensionais detalhadas sobre a estrutura florestal. Essa tecnologia, tradicionalmente aplicada em equipamentos especializados e drones, agora se torna mais acessível com a integração em dispositivos móveis, como o iPhone 13 Pro (Giongo, 2010).

A estimativa de variáveis dendrométricas, como diâmetro e altura das árvores, é fundamental para o manejo florestal sustentável. Métodos convencionais de mensuração, embora precisos, são frequentemente trabalhosos e consomem tempo. Nesse contexto, a portabilidade e praticidade oferecidas pelo sensor LiDAR presente no iPhone 13 Pro representam um avanço significativo. Este dispositivo não só facilita a coleta de dados em campo, mas também oferece a possibilidade de processamento imediato das informações, integrando-as a aplicativos especializados (White *et al.* 2016). Além disso, a análise desses dados pode ser combinada com outras tecnologias, como o sensoriamento remoto por satélite, para a obtenção de informações mais completas sobre a floresta (Wang *et al.*, 2019; Mors *et al.*, 2021).

O objetivo deste trabalho é avaliar a eficácia do sensor LiDAR do Iphone 13 Pro na estimativa de variáveis dendrométricas em áreas florestais plantadas. Para isso, foram realizadas coletas de diâmetro e altura em um povoamento de Mogno Africano (*Khaya ivorensis* A. Chey.) na região da Zona da Mata Norte de Pernambuco por meio de medição direta e através dos softwares, *FlorestScanner* e *Arboreal Tree*. Espera-se obter estimativas de diâmetro a 1,30 m do solo (D) e da altura (H) com o sensor LiDAR próximas às obtidas por meio de métodos convencionais de mensuração.

Com a crescente demanda por soluções tecnológicas que contribuam para a sustentabilidade e eficiência no manejo dos recursos naturais, este estudo visa demonstrar a viabilidade do uso de dispositivos móveis equipados com sensores LiDAR como ferramentas complementares na mensuração de variáveis florestais. A análise dos dados coletados permitirá uma melhor compreensão das vantagens e limitações dessa tecnologia, contribuindo para a inovação e aprimoramento das práticas de manejo florestal.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a precisão da utilização do sensor LiDAR em Iphone 13 Pro e de softwares para a estimativa de variáveis dendrométricas, oferecendo para geração de manejo florestal inovação e praticidade na coleta dos dados em campo.

2.2 Objetivos específicos

- a) Estimar D e H por meio do sensor LiDAR do Iphone 13 Pro com softwares de mensuração;
- b) Avaliar a precisão da estimativa obtida pelo sensor LiDAR do Iphone 13 Pro e mensuração convencional em campo;
- c) Identificar as principais limitações e desafios na obtenção das variáveis dendrométricas a partir do sensor LiDAR e propor soluções para superá-los.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 O avanço da tecnologia LiDAR

O desenvolvimento rápido e diversificado da tecnologia LiDAR se tem avançado significativamente em várias áreas. O LiDAR utiliza pulsos de luz que atingem objetos e detecta os pulsos que são refletidos de volta. Ele mede o intervalo de tempo que o pulso leva para retornar ao sensor após a reflexão, calculando assim a distância em relação ao objeto, ele pode ser utilizado para realizar varredura por meio de Laser Scanner Terrestre (TLS). Os levantamentos por TLS são caracterizados pela riqueza de detalhes dos objetos encontrados no campo de vista da estação no momento da varredura. No entanto, uma desvantagem é que os pontos não são identificados quanto ao tipo de objeto refletido, apenas as coordenadas (XYZ) e o valor de intensidade são registrados (Simonse *et al.*, 2003).

Por essa razão, TLS é amplamente utilizado em diversos campos, tais como, sensoriamento remoto, topografia, engenharia e arqueologia (Dahle *et al.*, 2021). Com o progresso contínuo dessa tecnologia, houve melhorias substanciais na precisão, resolução e eficiência dos sistemas LiDAR, tornando-os cada vez mais acessíveis e versáteis.

Uma das inovações mais importantes na tecnologia LiDAR é a redução de tamanho dos sensores, permitindo sua integração em diferentes plataformas, incluindo drones (VANT - veículos aéreos não tripulados), satélites e veículos terrestres. Isso amplia consideravelmente o alcance e as possibilidades do uso do LiDAR, tornando-o acessível para diversas aplicações em diferentes ambientes e escalas (Dandois *et al.*, 2017).

Além disso, o progresso da tecnologia LiDAR tem levado ao desenvolvimento de novos algoritmos e técnicas de processamento de dados que possibilitam uma análise mais eficiente e detalhada desses dados. Isso inclui recursos como segmentação automática de objetos, classificação de pontos em nuvem e extração de características 3D, entre outras técnicas avançadas (Zhong *et al.*, 2016).

O avanço da tecnologia LiDAR também tem sido impulsionado pela crescente necessidade de obter informações precisas e detalhadas sobre o ambiente natural e construído, abrangendo áreas como mapeamento florestal, monitoramento de recursos hídricos, planejamento urbano, gestão de infraestrutura etc (Çakir *et al.*, 2021).

3.2 Uso do sensor LiDAR na Engenharia Florestal

O uso do sensor LiDAR na engenharia florestal surgiu como uma ferramenta poderosa para caracterização e monitoramento eficiente e preciso de ecossistemas. Utilizando pulsos de laser, o LiDAR oferece um método rápido e detalhado de coleta de dados tridimensionais sobre a estrutura da floresta (Kötz, 2006). Esses dados são essenciais para uma variedade de aplicações de engenharia florestal, incluindo inventário, planejamento de manejo, análise de vegetação, modelagem de crescimento de árvores e estimativa de biomassa.

Dessa forma, para aquisição de informações a partir de nuvens de pontos em povoamentos florestais, a detecção das árvores e seu respectivo posicionamento constitui uma etapa essencial para obtenção de variáveis dendrométricas, como diâmetros, alturas e volumes individuais de troncos (Aschoff e Spiecker, 2004).

A capacidade do LiDAR de gerar informações detalhadas sobre a estrutura vertical e horizontal da floresta é particularmente valiosa para o planejamento e monitoramento de operações florestais. A aplicação da varredura laser terrestre (TLS) é uma alternativa para obtenção de variáveis dendrométricas em comparação aos métodos clássicos de mensuração florestal, permitindo a identificação e o mapeamento preciso da distribuição de árvores de diferentes classes de tamanho e espécies, o que possibilita um planejamento de colheita mais eficiente e sustentável (Khosravipour *et al.*, 2014).

Além disso, o LiDAR tem sido amplamente utilizado na modelagem de crescimento de árvores e estimativa de biomassa. Ao fornecer medições precisas da altura e densidade da copa das árvores, o LiDAR pode ajudar a prever o crescimento futuro das árvores e estimar a quantidade de biomassa armazenada em uma determinada área florestal (Crespo *et al.*, 2018).

Outra aplicação importante do LiDAR na engenharia florestal é a avaliação e monitoramento de distúrbios ecológicos como incêndios, doenças e infestações de insetos. A capacidade do LiDAR de penetrar na copa da floresta e fornecer informações detalhadas sobre a estrutura interna da vegetação permite uma avaliação precisa dos danos causados por estas perturbações e uma melhor compreensão dos seus efeitos a longo prazo. (Jaskierniak *et al.*, 2021).

3.3 Aperfeiçoamento de aplicativos para variáveis dendrométricas

O aperfeiçoamento de aplicativos para estimativa de variáveis dendrométricas utilizando tecnologia LiDAR tem sido uma área de crescente interesse na ciência florestal. Melhorar as estimativas de variáveis dendrométricas com a tecnologia LiDAR é uma área de crescente interesse na silvicultura. O LiDAR, que utiliza pulsos de laser para medir a distância entre um sensor e objetos no ambiente circundante, oferece uma forma precisa e eficiente de coleta de dados sobre a estrutura da floresta. Ao integrar o LiDAR em aplicações de inventário florestal, informações detalhadas sobre variáveis dendrométricas, como altura, diâmetro e volume das árvores, podem ser obtidas com rapidez e precisão (Yamamoto *et al.*, 2019; D' Oliveira *et al.*, 2014).

Esses aplicativos melhorados têm o potencial de revolucionar a forma como os inventários florestais são conduzidos, oferecendo uma alternativa eficiente aos métodos tradicionais que são muitas vezes demorados. Além disso, a precisão e a objetividade dos dados coletados pelo LiDAR podem melhorar a tomada de decisões sobre questões relacionadas ao manejo florestal e à conservação da biodiversidade (Fassnacht *et al.*, 2016).

O uso do LiDAR em aplicativos e softwares para estimativas dendrométricas também pode facilitar o monitoramento de mudanças na estrutura e composição florestal ao longo do tempo. Isto é essencial para avaliar o impacto das alterações climáticas, das perturbações naturais e das atividades humanas nas florestas e para desenvolver estratégias de gestão adaptativa (Jackson, *et al.*, 2020).

Além disso, o aperfeiçoamento contínuo destes aplicativos (ou softwares) podem abrir novas oportunidades de estudos e pesquisas nas inovações na área de sensoriamento remoto e ciência florestal, utilizando da integração de tecnologias emergentes, como a inteligência artificial e a aprendizagem automática, pode aumentar ainda mais a eficiência e a precisão da recolha e análise de dados dendrométricos (Silva *et al.*, 2023).

3.4 O uso do iPhone para coleta de dados florestais

O uso do iPhone para coleta de dados florestais representa uma abordagem inovadora e promissora para pesquisa e gestão de recursos naturais. Ao incorporar tecnologias avançadas como o sensor LiDAR presente no iPhone 12 Pro e 13 Pro, os pesquisadores têm acesso a uma ferramenta versátil e portátil para aquisição de dados tridimensionais de ambientes florestais (Gollob *et al.*, 2021). O LiDAR permite a medição precisa de distâncias e a criação de modelos tridimensionais do terreno, o que é essencial para a caracterização da estrutura e da dinâmica das florestas.

As tecnologias para inventário florestal baseadas em softwares utilizados em smartphones têm se destacado por serem portáteis, simples e intuitivas, bem como por permitirem sua utilização por usuários sem profundo conhecimento técnico em relação à medição de florestas. (Sandim *et al.*, 2023). A utilização do iPhone para essa coleta de dados oferece diversas vantagens em relação aos métodos tradicionais. Além da portabilidade e facilidade de uso, os aplicativos disponíveis na plataforma iOS permitem a integração de diferentes tipos de dados como imagens e georreferenciamento, proporcionando uma abordagem multifacetada e abrangente para a coleta de dados florestais (Luetzenburg *et al.*, 2021).

Outro benefício de usar um iPhone para coletar dados florestais é a capacidade de integrar os dados coletados em sistemas de informação geográfica (GIS) e plataformas de modelagem 3D. Isto permite a análise e visualização de dados num contexto espacial e facilita a tomada de decisões informadas sobre a gestão florestal e a conservação da biodiversidade (King *et al.*, 2022).

3.5 Integração de tecnologias em povoamentos de Mogno Africano (*Khaya ivorensis* A. Chev.)

O Mogno Africano (*Khaya ivorensis* A. Chev.) é uma espécie de árvore tropical pertencente à família Meliaceae, nativa das regiões tropicais da África Ocidental. É amplamente reconhecida pela sua madeira de alta qualidade, que é utilizada na fabricação de móveis, pisos e outros produtos de madeira de alto valor. Em razão da sua alta demanda, *Khaya ivorensis* tem sido amplamente cultivada em povoamentos florestais em várias regiões tropicais do mundo. Segundo Orwa *et al.* (2009), essa espécie é adaptável a uma variedade de condições ambientais, mas prospera melhor em solos bem drenados e ricos em nutrientes, com precipitação anual entre 1.200 e 2.500 mm.

A literatura destaca que a implantação de povoamentos de Mogno Africano pode ser uma estratégia eficaz de manejo florestal sustentável, oferecendo benefícios econômicos e ambientais. De acordo com Appiah *et al.* (2009), esses povoamentos podem contribuir para a mitigação das mudanças climáticas através do sequestro de carbono, além de proporcionar habitats para a fauna local. A espécie também apresenta uma boa capacidade de regeneração natural, o que facilita a manutenção de populações viáveis a longo prazo (Ofori *et al.*, 2007).

Segundo Ofori *et al.* (2007), a seleção genética e a clonagem de indivíduos superiores são estratégias promissoras para aumentar a produtividade dos povoamentos.

Na prática de pesquisa, o monitoramento do crescimento e da saúde dos povoamentos de *Khaya ivorensis* envolve uma série de medições e metodologias. Medidas de diâmetro a 1,30 m do solo (D), altura (H) e volume de madeira são frequentemente usadas para avaliar o crescimento das árvores. Segundo Oliveira *et al.* (2018), essas medições são cruciais para modelar o crescimento e prever a produtividade dos povoamentos. Técnicas avançadas, como a utilização de tecnologias LiDAR e drones, têm sido empregadas para fornecer dados precisos e em grande escala sobre a estrutura e a densidade dos povoamentos, permitindo uma gestão mais eficiente e precisa (Rosette *et al.*, 2012).

Uma das principais vantagens do LiDAR é a sua capacidade de coletar dados em grande escala com alta precisão, o que é especialmente útil em áreas de difícil acesso. Isso permite um monitoramento contínuo e abrangente dos povoamentos florestais no geral, facilitando a detecção precoce de mudanças na estrutura florestal e na saúde das árvores (Dubayah & Drake, 2000).

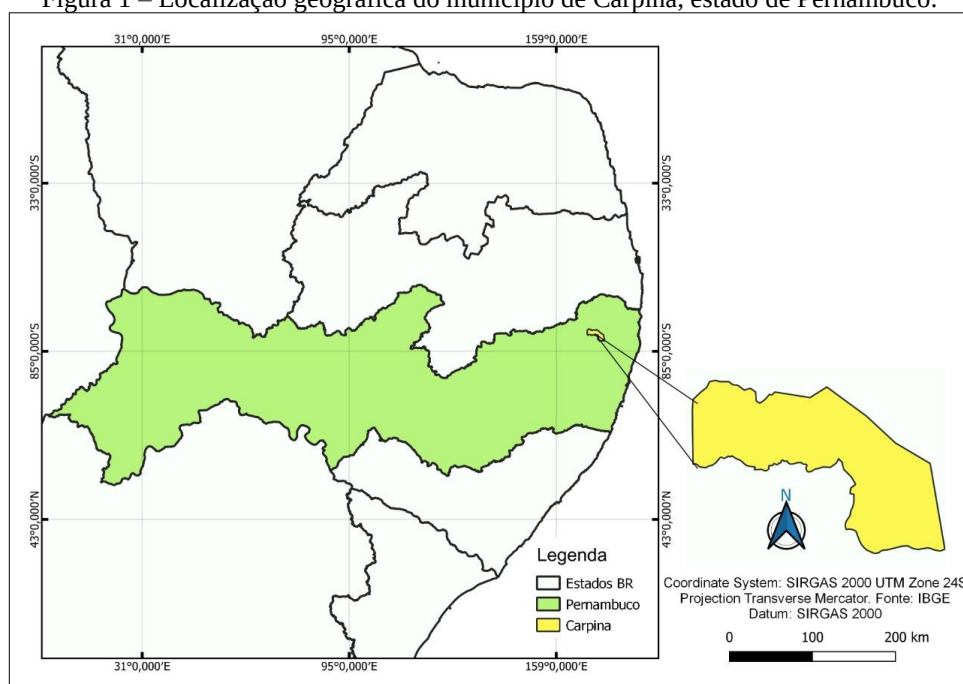
4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização da área de estudo

O estudo foi realizado em uma área de Estação Experimental de Cana-de-açúcar do Carpina (EECAC – UFRPE) localizada no município de Carpina, região da Zona da Mata Norte no estado de Pernambuco, ficando em uma distância de 45 km da capital do estado, Recife (Figura 1), com aproximadamente 261,9 hectares de área. Para este estudo foi selecionada área com um povoamento de Mogno Africano (*Khaya ivorensis* A. Chey.).

Segundo a classificação de Koppen, o município apresenta um clima do tipo As caracterizado como um clima tropical quente e úmido, com estação seca no inverno (Medeiros *et al*, 2021).

Figura 1 – Localização geográfica do município de Carpina, estado de Pernambuco.



Fonte: Autora (2024).

4.2 Coleta de dados

Os dados de campo para este estudo foram coletados no final do mês de maio de 2023, em um povoamento de Mogno Africano com espaçamento de 5,5 m x 4 m, com aproximadamente 7 anos de idade em uma área de 0,4 ha (Figura 2). Para a aquisição das coordenadas, utilizou-se o aplicativo Google Maps.

Figura 2 – Parcela de estudo na ECCAC – UFRPE e coordenadas utilizadas pelo Google Maps.



Fonte: Autora (2024).

O levantamento de dados foi realizado por meio de duas visitas ao local. Foram mensurados a circunferência a 1,30 m do solo (C), o diâmetro a 1,30 m do solo (D) e a altura (H) das 26 (vinte e seis) árvores na área de estudo.

Na primeira visita, foram coletados dados de forma convencional na mensuração florestal de cada árvore, com uma fita métrica foi mensurada a circunferência a 1,30 m do solo (C), posteriormente transformada em diâmetro a 1,30 m do solo (D). Para a coleta de dados da altura (H) das árvores, foi utilizado o hipsômetro de *Blume-Leiss*. Ao mesmo tempo em que os dados manuais eram coletados, as informações de localização e as medidas de diâmetro (D) e altura (H) dessas árvores foram registradas e digitalizadas por meio dos softwares *ForestScanner* e *Arboreal Tree* utilizando sensor LiDAR do smartphone iPhone 13 Pro.

A segunda visita foi feita especificamente para refinar e corrigir quaisquer imperfeições nos dados coletados utilizando o sensor LiDAR do smartphone iPhone 13 Pro.

4.2.1 Equipamentos utilizados

Os equipamentos utilizados para a coleta deste estudo foram divididos entre: os equipamentos convencionais para mensuração florestal e o uso do smartphone Iphone 13 Pro com o sensor LiDAR para a coleta comparativa.

a) Equipamentos convencionais para mensuração florestal

Os equipamentos de uso tradicional para a mensuração de diâmetro e altura foram selecionados com base nas coletas convencionais a fim de que fosse obtida a melhor comparação com a forma convencional. Os equipamentos selecionados foram um hipsômetro de *Blume-Leiss*, utilizado para medir a altura (H) de uma árvore de forma em que ele mensura o ângulo entre a linha de visão do observador e o topo da árvore, junto com a distância entre o observador e a base da árvore. Já para medir a circunferência (C) das árvores, foi selecionada uma fita métrica para calcular a circunferência e distância entre a árvore e o observador para as medidas da altura.

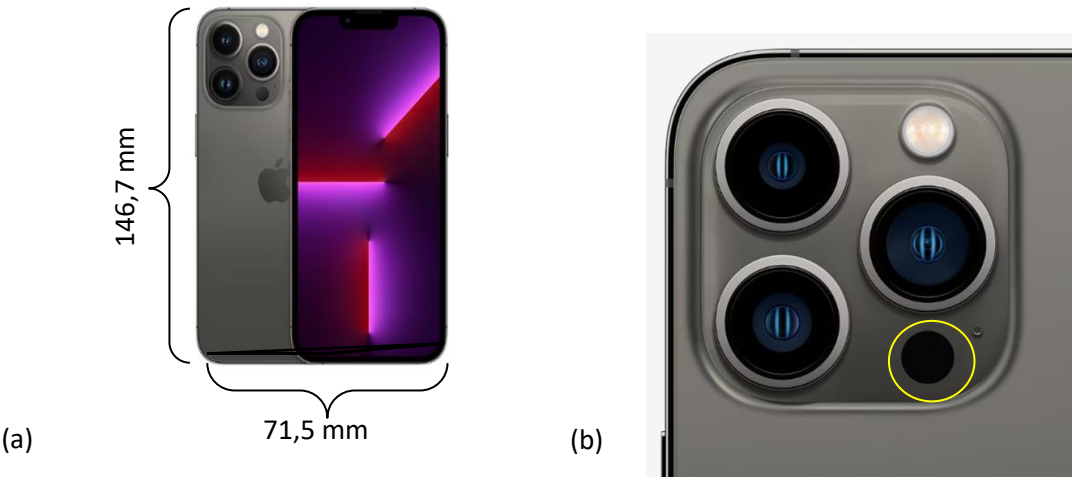
Esses equipamentos são fundamentais para coletar dados precisos sobre as árvores na parcela analisada, fornecendo informações importantes para realizar comparação entre as análises realizadas no presente estudo.

b) Smartphone Iphone 13 Pro

O Iphone 13 Pro foi selecionado para analisar a viabilidade e precisão do seu sensor LiDAR na coleta dos dados em áreas florestais. A escolha deste equipamento foi feita por conta da sua compatibilidade e portabilidade que é visado para facilitar o seu uso em áreas florestais de difícil acesso. Além disso, a transferência de dados em tempo real com o serviço que o smartphone apresenta possibilita uma colaboração eficaz em projetos de coleta.

O sensor LiDAR do iPhone 13 Pro é uma tecnologia avançada que usa pulsos de luz laser para medir distâncias e criar mapas tridimensionais precisos do ambiente ao redor do dispositivo. Esse sensor é capaz de detectar objetos e superfícies com grande precisão, tornando-o ideal para realidade aumentada, fotografia computacional e mapeamento. Além disso, o LiDAR melhora significativamente o desempenho do foco automático em condições de pouca luz, proporcionando fotos e vídeos mais nítidos e detalhados.

Figura 3 – Dimensões (a) e sensor LiDAR na câmera traseira (b) do smartphone Iphone 13 Pro.



Fonte: Autora (2024).

4.2.2 Softwares

a) **ForestScanner**

O *ForestScanner* é um software utilizado para mensuração de diâmetro a 1,30 m do solo (D) de forma prática e sem a necessidade da utilização de suta em campo. O software utiliza o sensor LiDAR que contém em alguns smartphones, permitindo fazer uma leitura e estimar o diâmetro da árvore. Na Tabela 1 encontram-se alguns informativos sobre o software e suas funções.

Tabela 1 - Resumo das principais informações do software *FlorestScanner*.

Plataforma Disponível	Valor de Licença	Metodologia de Coleta de Dados	Resultados	Informações
Android e IOS (com sensor LiDAR)	Grátis	Captura de imagem de árvore individual	-Diâmetro	-Distância máxima de varredura do sensor é de 5 m
			-Scanner 3D da área	
			-Coordenadas das árvores	-Necessário trena para dar o distanciamento
			-Cria um arquivo da lista salva de informações de uma ou mais árvores	-O erro de diâmetro a 1,30 m do solo está dentro de 2 cm
				-Funciona off-line

Fonte: Autora (2024).

A coleta de dados usando o software foi realizada com base no manual do próprio software, onde requer uma distância de 3 m entre a árvore e o usuário para adquirir uma nuvem de pontos 3D na superfície da árvore analisada. Ao usar o *ForestScanner*, a nuvem de pontos e

as malhas de triângulos 3D aparecem na tela em tempo real, permitindo que o usuário reconheça visualmente as superfícies digitalizadas (Figura 4).

Para melhores resultados e analisar a eficiência do aplicativo, foi utilizada uma trena para auxiliar na medição da altura do peito (1,30 cm) para coletar a estimativa do diâmetro (D) com o software. Após a coleta do diâmetro, os dados obtidos pelo software foram transportados para o Microsoft Excel em forma de planilha que o próprio software realiza com todas as informações sobre a mensuração (Figura 5).

Figura 4 - Imagem da leitura do diâmetro (D) do sensor LiDAR através do software *FlorestScanner*.



Fonte: Autora (2024).

Figura 5 – Planilha do software *ForestScanner* com os dados obtidos pelo sensor LiDAR.

List of single tree information						OK
Point	Number	Latitude (°)	Longitude (°)	Elevation (m)	Diameter (cm)	
✓	1	-7.850876160395258	-35.23888163689583	181.1441057473421	30,2	
✓	2	-7.850893735925278	-35.2388502554375	181.1109659075737	12,7	
✓	3	-7.8508937222786095	-35.23885060340247	181.1162333190441	21,4	
✓	4	-7.850910624431408	-35.23881849922511	181.05187499523163	29,0	
✓	5	-7.850910053348111	-35.23881845266065	181.1766024529934	18,4	
✓	6	-7.850910194007585	-35.23881855336276	181.11185503005981	20,3	
✓	7	-7.8509262169398095	-35.238786188684664	181.1109659075737	19,6	
✓	8	-7.850926193959192	-35.23878621592313	181.04985478520393	19,5	
✓	9	-7.85092606210919	-35.23878605806817	181.23096591234207	18,8	

Fonte: Autora (2024).

b) Arboreal Tree

O *Arboreal Tree* é um software que consegue realizar a estimativa do diâmetro (D) e da altura (H) da árvore apenas com o smartphone de forma prática sem a necessidade da utilização de suta em campo, trena ou qualquer outro equipamento convencional para mensuração. Além de entregar essas informações, o software é mais amplo e coleta dados sobre a inclinação da medição, coordenadas da árvore, largura de copa (Tabela 2), diferente do software *ForestScanner*.

Tabela 2 - Resumo das principais informações do software *Arboreal Tree*.

Sistema operacional	Valor de Licença	Metodologia de Coleta de Dados	Resultados	Informações
IOS (com sensor LiDAR);	US\$ 22,99	Captura de imagem de árvore individual	-Diâmetro	-Não precisa de ferramentas ou bastões de referência extras
			-Diâmetro médio	
			-Altura;	-O erro de diâmetro a 1,30 m do solo está dentro de 2 cm
			-Inclinação;	
			-Área basal por hectare	-O erro de altura está dentro 2% (RMSE)
			-Número de árvores por hectare	
			-Mensura área de copa da árvore	-Funciona off-line
			-Coordenadas das árvores	
			-Cria um arquivo da lista salva de informações de uma ou mais árvores	

Fonte: Autora (2024).

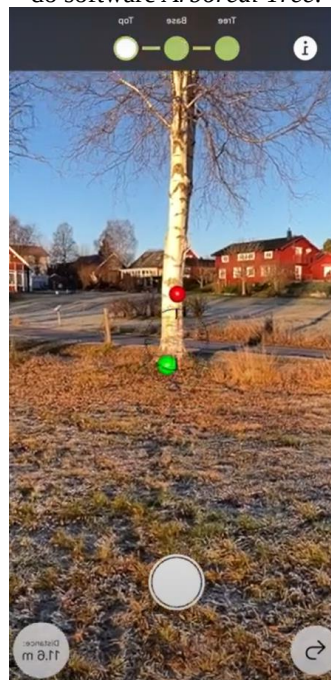
Partindo da mesma premissa do *ForestScanner*, o *Arboreal Tree* utiliza o sensor LiDAR para fazer uma leitura (scanner) dessas informações da árvore. A coleta de dados realizada pelo software *Arboreal Tree* foi feita de acordo com as informações do seu manual para obter melhor exatidão da extração dos dados em campo.

Como o próprio software tem a finalidade de ser apenas ele para a mensuração, não foi utilizado nenhum outro suporte enquanto a coleta estava sendo realizada. Com isso, para a realização dos dados da altura das árvores da parcela, foi necessário o usuário se aproximar da árvore para marcá-la e em seguida, se afastar alguns metros e marcar a base e o topo da árvore

(o software conta esse distanciamento no visor) (Figura 6 e 7) e em seguida, a altura da árvore foi apresentada na tela do smartphone.

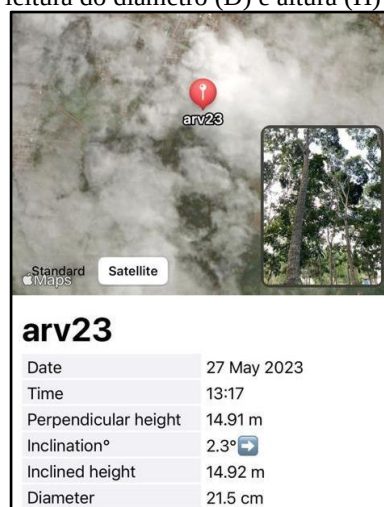
A coleta da estimativa do diâmetro (D) foi realizada simultaneamente com a da altura (H), já que o próprio software realiza automaticamente quando seleciona o fuste da árvore no momento da coleta, onde o software apresenta na tela do smartphone a árvore analisada.

Figura 6 – Interface da seleção das árvores para obter a leitura do diâmetro (D) e altura (H) do através do software *Arboreal Tree*.



Fonte: Arboreal (2023).

Figura 7 – Resultado da leitura do diâmetro (D) e altura (H) através do software *Arboreal Tree*.



Fonte: Autora (2024).

4.2.3 Variáveis analisadas

a) Altura (H)

Para a medição convencional da altura total das árvores, foi utilizado o clinômetro o *Blume-Leiss*. Ele opera usando trigonometria simples para calcular a altura da árvore, para a utilização desse equipamento é necessário o conhecimento da distância horizontal entre o observador e a árvores a ser medido juntamente com o ângulo entre a linha de visão do observador e o topo da árvore. Essa distância foi obtida com o auxílio de uma trena entre a árvore e o observador.

Para melhor eficiência do equipamento, foi utilizado uma altura fixa da base da árvore até o olhar do observador de 1,56 m.

b) Diâmetro a 1,30 m do solo (D)

Para a medição convencional da circunferência a 1,30 m do solo (C) foi utilizado uma trena, priorizando uma altura de 1,30 metros acima da base, para posterior cálculo do diâmetro a 1,30 m do solo (D), com base na seguinte fórmula proposta por Oliveira *et al.* (2018):

$$D = \frac{C}{\pi}$$

Em que: D é o diâmetro a 1,30 m do solo; C é a circunferência a 1,30 m do solo.

As variáveis analisadas pelos softwares foram obtidas automaticamente sem necessidade de adaptação.

4.2.4 Modelos Estatísticos

Como se trata de estimativas foi necessário ajustar modelos para saber qual melhor representa os dados para esta situação. Os modelos hipsométricos que foram testados estão descritos na Tabela 3.

Tabela 3 - Modelos hipsométricos testados.

Modelo	Autor	Equação
1	Curtis	$LnHi = \beta_0 + \beta_1 \frac{1}{Di} + \varepsilon_i$

2	Linha Reta	$H_i = \beta_0 + \beta_1 D_i + \varepsilon_i$
3	Stofel	$\ln H_i = \beta_0 + \beta_1 (\ln D_i) + \varepsilon_i$
4	Curtis ²	$\ln H_i = \beta_0 + \beta_1 \frac{1}{D_i^2} + \varepsilon_i$

Fonte: Adaptada de Cunha (2004) e Curtis (1967).

Em que: H = altura total (m) i-ésima árvore; β_0 e β_1 = parâmetros do modelo; D_i = diâmetro (cm) da i-ésima árvore a 1,30 m do solo; ε_i = erro aleatório; Ln = logaritmo neperiano.

4.3 Processamento dos dados

Depois de reunir os dados, as informações foram inseridas em planilhas utilizando o programa Microsoft Excel para organização e tabulação dos dados. Os dados referentes à altura (H) e diâmetro a 1,30 m do solo (D) coletados pelo software *Arboreal Tree* e *FlorestScanner* foram submetidos a uma análise de regressão linear para obtenção do coeficiente de determinação (R^2), e com isso, obter uma melhor explicação sobre a precisão dos softwares em estudo.

Na Tabela 4 pode ter uma visão detalhada dos dados obtidos durante o estudo, abrangendo informações relacionadas ao diâmetro (D) mensurado manualmente e o D estimado pelos softwares *ForestScanner* e *Arboreal Tree*.

Tabela 4 - Diâmetros a 1,30 m do solo (D) mensurados de forma convencional, diâmetros 1,30 m do solo (D) estimado pelos softwares *FlorestScanner* e *Arboreal Tree* e a diferença entre o D real com os softwares.

n	D real (cm)	D FlorestScanner (cm)	D Arboreal Tree (cm)	Diferença entre D real e D FlorestScanner (cm)	Diferença entre D real e D Arboreal Tree (cm)
1	22,92	18,70	21,90	4,22	1,02
2	23,49	24,30	23,00	-0,81	0,49
3	20,82	21,30	21,70	-0,48	-0,88
4	19,45	19,00	18,70	0,45	0,75
5	27,34	22,80	25,30	4,54	2,04
6	17,48	13,80	15,90	3,68	1,58

7	11,24	10,60	9,90	0,64	1,34
8	28,52	26,80	27,20	1,72	1,32
9	23,71	21,70	22,60	2,01	1,11
10	25,66	23,40	22,30	2,26	3,36
11	24,10	23,40	23,70	0,7	0,4
12	25,21	21,20	23,80	4,01	1,41
13	24,03	19,80	22,20	4,23	1,83
14	30,91	30,60	27,20	0,31	3,71
15	15,60	14,50	14,60	1,1	1
16	25,21	26,00	25,70	-0,79	-0,49
17	25,59	21,40	23,60	4,19	1,99
18	21,68	22,50	21,10	-0,82	0,58
19	18,18	16,20	17,10	1,98	1,08
20	20,79	20,50	20,70	0,29	0,09
21	21,77	21,20	22,10	0,57	-0,33
22	16,55	16,50	15,00	0,05	1,55
23	14,32	14,10	13,40	0,22	0,92
24	26,58	24,30	25,60	2,28	0,98
25	21,17	21,80	19,30	-0,63	1,87
26	24,03	23,50	22,30	0,53	1,73

Fonte: Autora (2024).

O *Arboreal Tree* por se tratar de um software que também gera a estimativa da altura da árvore, os dados na Tabela 5 oferecem uma visão detalhada dos valores obtidos durante o estudo, abrangendo informações relacionadas à altura (H) estimada por meio do hipsômetro Blume-Leiss e a altura (h) estimado pelo software *Arboreal Tree*.

Tabela 5 - Alturas (H) mensuradas com Blume-Leiss, a altura (h) estimadas pelo software *Arboreal Tree* e a diferença entre H real e h *Arboreal Tree*.

n	H real (m)	h Arboreal Tree (m)	Diferença entre H real e h Arboreal Tree (m)
1	18,06	19,00	-0,94
2	17,56	18,00	-0,44
3	15,56	15,00	0,56
4	15,06	15,80	-0,74
5	19,06	18,20	0,86
6	13,56	14,20	-0,64
7	6,06	6,80	-0,74
8	17,64	17,60	0,04
9	17,56	16,80	0,76

10	16,06	16,30	-0,24
11	16,56	15,90	0,66
12	15,56	14,60	0,96
13	13,06	13,40	-0,34
14	15,56	15,90	-0,34
15	14,06	13,00	1,06
16	17,56	17,00	0,56
17	18,56	18,10	0,46
18	17,06	16,70	0,36
19	18,06	19,90	-1,84
20	20,56	18,50	2,06
21	16,15	19,00	-2,85
22	14,65	17,10	-2,45
23	10,15	12,10	-1,95
24	18,65	15,60	3,05
25	19,15	16,90	2,25
26	19,65	17,60	2,05

Fonte: Autora (2024).

Através das variáveis analisadas e obtidas pelos softwares (altura e diâmetro), foi realizada a escolha da equação hipsométrica que melhor se adequa às condições apresentadas neste trabalho, em comparação à forma convencional de mensuração. Para isso, foi analisado o valor do R² ajustado (Tabela 6).

Tabela 6 - R²aj (coeficiente de determinação ajustado) dos modelos hipsométricos testados para selecionar melhor modelo.

Modelo	Autor	R ² aj	Relação
1	Curtis	0,66	ALTURA REAL x D APP
		0,60	ALTURA APP x D REAL
		0,48	ALTURA REAL x D REAL
		0,55	ALTURA APP x D APP
2	Linha Reta	0,40	ALTURA REAL x D APP
		0,33	ALTURA APP x D REAL
		0,23	ALTURA REAL x D REAL
		0,32	ALTURA APP x D APP
3	Stofel	0,54	ALTURA REAL x D APP
		0,47	ALTURA APP x D REAL

4	Curtis ²	0,36	ALTURA REAL x D REAL
		0,44	ALTURA APP x D APP
		0,75	ALTURA REAL x D APP
		0,71	ALTURA APP x D REAL
		0,64	ALTURA REAL x D REAL
		0,64	ALTURA APP x D APP

Fonte: Autora (2024).

Entre as equações ajustadas, o modelo de Curtis² apresentou estatísticas de ajuste e precisão sutilmente mais favoráveis aos demais, motivo este pelo qual se tornou o mais apropriado para a obter as estimativas.

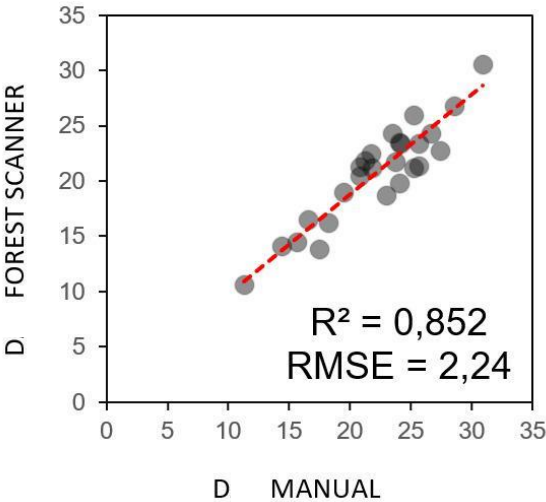
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Precisão das estimativas com o sensor LiDAR no Iphone 13 Pro

5.1.1 Relação do diâmetro convencional com o diâmetro do software *FlorestScanner* e *Arboreal Tree*

Para avaliar as semelhanças e diferenças nos valores de diâmetro a 1,30 m do solo (D) medido pelo software *ForestScanner* entre os métodos convencionais (utilização da fita métrica) , foi calculado uma análise de representação gráfica e teste estatístico com base no coeficiente de determinação (R²) e na raiz quadrada do erro médio (RMSE) (Figura 8).

Figura 8 – Diâmetro a 1,30 m do solo (D) do *FlorestScanner* e diâmetro a 1,30 m do solo (D) manual.



Fonte: Autora (2024).

O gráfico revela uma forte correlação entre as medições manuais e as obtidas pelo *ForestScanner*, conforme indicado pelo coeficiente de determinação (R^2) de 0,852. Esse valor sugere que aproximadamente 85,2% da variação nas medições do scanner podem ser explicadas pelas medições manuais, evidenciando uma boa concordância entre os métodos. A linha de tendência, representada pela linha vermelha tracejada, demonstra que as medições seguem uma tendência linear, indicando que o scanner florestal fornece medições consistentes em relação ao método manual.

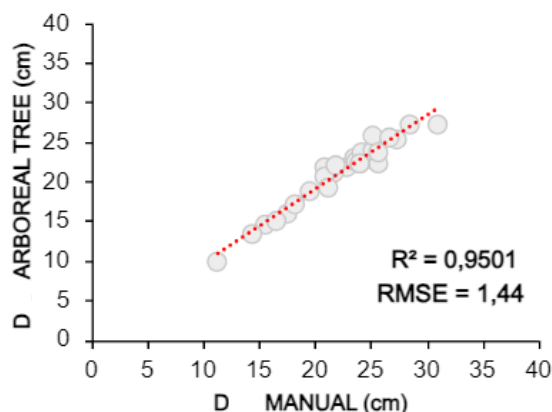
O Erro Médio Quadrático (RMSE) de 2,24 cm indica o erro médio das previsões do scanner em relação aos valores reais medidos manualmente. Um RMSE relativamente baixo, como este, sugere que as discrepâncias entre os dois métodos são pequenas, reforçando a precisão do *ForestScanner*. Os pontos no gráfico representam as medições individuais, a proximidade desses pontos à linha de tendência indica que a maioria das medições pelo scanner está próxima dos valores manuais, permitindo, contudo, identificar quaisquer outliers ou discrepâncias que possam precisar de investigação adicional.

Com base na alta correlação e no baixo erro, pode-se argumentar que o scanner florestal é uma ferramenta válida e eficiente para medir o diâmetro das árvores, economizando tempo e esforço em comparação com as medições manuais. Além disso, este gráfico serve como uma validação prática do software de *ForestScanner*, demonstrando sua eficácia e precisão em condições de campo reais.

O software *ForestScanner* é reconhecido como uma ferramenta revolucionária para realizar inventários florestais. Através do uso de dispositivos iOS equipados com LiDAR, este software se destaca como uma opção promissora, reduzindo a necessidade de trabalho manual e o tempo gasto no campo em comparação com métodos tradicionais, como medições com fita métrica.

Isso realça a praticidade e a eficácia do software na coleta de dados sobre árvores, contribuindo significativamente para a melhoria dos inventários florestais. Já os dados obtidos por meio do software *Arboreal Tree* foram analisados por meio de uma representação gráfica e teste estatístico com base no coeficiente de determinação (R^2) e na raiz quadrada do erro médio (RMSE) (Figura 9).

Figura 9 – Diâmetro (D) *Arboreal Tree* e D manual.



Fonte: Autora (2024).

A análise estatística das medições obtidas pelo *Arboreal Tree* em comparação com as medições manuais revelou uma correlação muito forte, evidenciada pelo coeficiente de determinação (R^2) de 0,9501. Isso indica que aproximadamente 95,01% da variação nas medições do scanner pode ser explicada pelas medições manuais, demonstrando uma excelente concordância entre os métodos.

A linha de tendência, reforça a precisão do *Arboreal Tree* ao seguir uma tendência linear muito forte em relação ao método manual. O erro médio quadrático (RMSE) de 1,44 cm sugere um erro médio mínimo nas previsões do *Arboreal Tree* em comparação com os valores reais medidos manualmente, indicando que as discrepâncias entre os métodos são mínimas e reforçando a precisão do software, software fornece uma faixa de erro de 4-9%. Isso demonstra que o software está operando conforme esperado e que suas medições são consistentes com os limites de precisão estabelecidos.

A visualização das discrepâncias entre as medições individuais no gráfico revela que a maioria dos pontos está muito próxima da linha de tendência, sugerindo alta precisão do *Arboreal Tree*. A aplicabilidade prática do *Arboreal Tree* é destacada pela eficiência e economia de tempo em comparação com as medições manuais. O gráfico valida o software demonstrando sua eficácia e precisão em condições de campo reais.

A análise estatística (Tabela 6) apresenta a viabilidade da aplicação do software *ForestScanner* e do *Arboreal Tree* como uma alternativa confiável para estimar o diâmetro (D) das árvores, fornecendo possibilidades para práticas de mensuração florestal. Sendo o software *Arboreal Tree* que melhor apresentou um desvio padrão em comparação aos demais.

Tabela 7 - Estatística descritiva e comparação dos dados de diâmetro a 1,30 m do solo (D) convencional e os softwares *FlorestScanner* e *Arboreal Tree*.

	Média	Desvio padrão	Variância da amostra	Máximo	Mínimo
D convencional	22,17	4,59	21,07	30,91	11,24
D <i>FlorestScanner</i>	20,77	4,47	20,00	30,60	10,60
D <i>Arboreal Tree</i>	21,00	4,39	19,27	27,20	9,90

Fonte: Autora (2024).

Com base na análise estatística apresentada, observa-se que tanto o *FlorestScanner* quanto o *Arboreal Tree* produzem medições de diâmetro das árvores altamente comparáveis ao método convencional. As diferenças observadas nas médias, desvios padrão, variâncias, e valores máximos e mínimos são pequenas e estão dentro de uma faixa aceitável de variação.

Os softwares demonstram menor variabilidade nas medições, com menores desvios padrão e variâncias, sugerindo uma maior precisão e consistência em comparação com o método convencional. As pequenas diferenças nas médias indicam que os softwares podem ser usados de forma confiável em substituição ou complemento às medições manuais, trazendo benefícios em termos de eficiência e potencial redução de erro humano.

Os resultados obtidos estão alinhados com o estudo realizado por Tatsumi *et al.* (2022), onde constatou a precisão do uso do *ForestScanner* com o Iphone 12 Pro com RMSE de 2,27 cm e R^2 de 0,963 em uma parcela de floresta mista e com diferentes idades. Já o estudo realizado por Sandim *et al.* (2023) em um povoamento de *Eucalyptus* spp, constatou a precisão do uso do *Arboreal Tree* com o Iphone 12 Pro quando comparada com a mensuração de forma convencional.

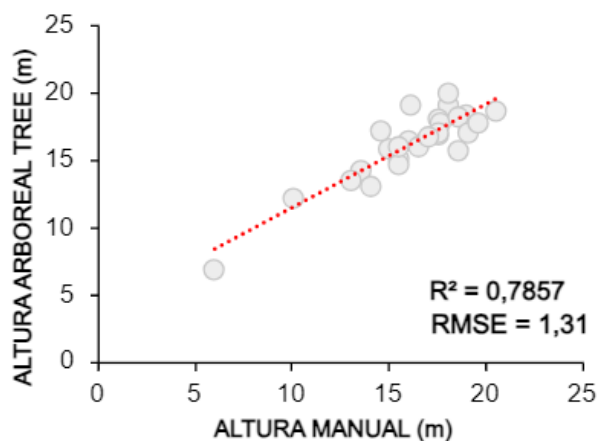
Diante dos valores encontrados no presente estudo, foi possível observar a uniformidade nos resultados e fortalecer a conclusão de que a utilização de dispositivos iOS com tecnologia LiDAR, com os softwares *ForestScanner* e o *Arboreal Tree*, não só simplifica a coleta de dados, mas também proporciona uma abordagem de boa concordância para a realização de levantamentos dendrométricos.

5.1.2 Relação da altura convencional com a altura do software *Arboreal Tree*

Para a altura, o mesmo processo se repetiu para o valor da altura (H) medida de forma convencional em função da altura (H) obtida pelo software *Arboreal Tree*, onde apresentou-se um R^2 de 0,7857 e um RMSE de 1,31 m.

Considerando o erro médio em que o próprio software coloca como uma margem (2% RMSE) para a altura (H), os dados forneceram uma medida útil da precisão do modelo em relação aos dados observados (Figura 10).

Figura 10 – Altura (h) do *Arboreal Tree* e altura (H) manual.



Fonte: Autora (2024).

A partir dos valores obtidos do coeficiente de determinação (R^2), é possível verificar que há uma relação das variáveis coletadas sendo considerado um fator de precisão da altura (H) entre a forma de mensuração convencional e o software *Arboreal Tree*.

No entanto, por não estar sendo utilizado uma relação hipsométrica, o RSME apresentado do D e na altura (H) não tem uma interpretação direta como se tivesse um modelo específico associado. Nesse caso, o RMSE indica a magnitude média das diferenças entre os valores observados (mensuração convencional) e os previstos (mensuração obtida pelo software).

A análise estatística (Tabela 7) indica a viabilidade da aplicação do software *Arboreal Tree* como uma alternativa confiável para a medição de altura, fornecendo possibilidades para práticas de mensuração florestal.

Tabela 8 - Estatística de comparação dos dados de altura (H) convencional e a altura (h) do software *Arboreal Tree*.

	Média	Desvio padrão	Variância da amostra	Máximo	Mínimo
H convencional	16,20	3,10	9,62	20,56	6,06
h <i>Arboreal Tree</i>	16,12	2,71	7,35	19,90	6,80

Fonte: Autora (2024).

A análise estatística dos dados de altura revela que o software *Arboreal Tree* fornece medições comparáveis às obtidas por métodos convencionais, apresentando uma ligeira

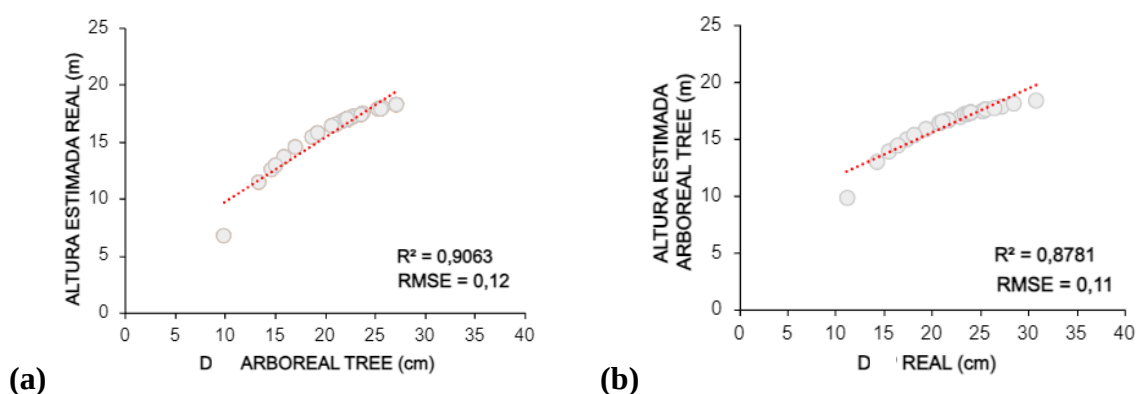
vantagem em termos de consistência, evidenciada pelo menor desvio padrão e variância. As médias das medições são quase idênticas, indicando que o software pode ser considerado preciso em relação ao método tradicional.

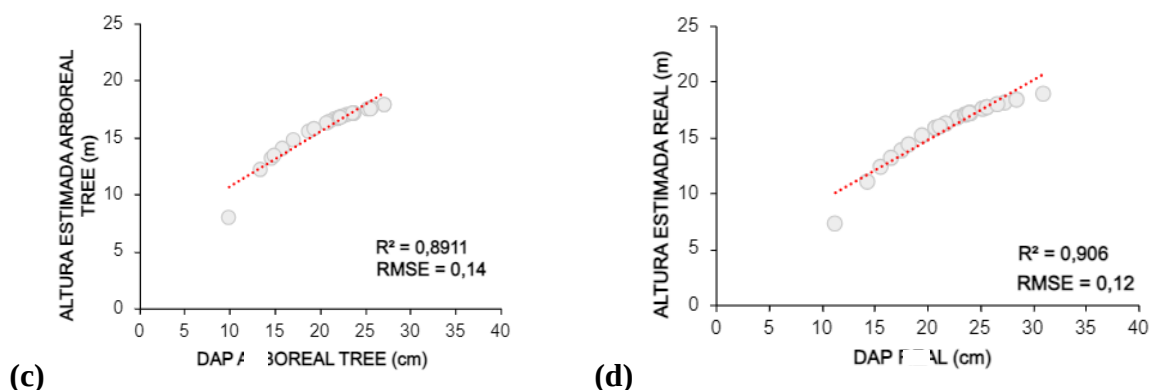
Esses resultados sustentam o uso do software *Arboreal Tree* como uma alternativa eficaz e eficiente para medições de altura em estudos florestais. Além dos resultados estatísticos favoráveis, o uso do software *Arboreal Tree* oferece vantagens significativas em termos de eficiência e praticidade, economizando tempo e esforço nas medições de campo e aumentando a eficiência operacional. A alta correlação e precisão das medições com o software permitem sua aplicação em pesquisas científicas e manejos florestais, garantindo resultados confiáveis e reprodutíveis.

A utilização de tecnologias avançadas, como o software *Arboreal Tree*, demonstra uma evolução nas metodologias de medição, possibilitando a integração de dados digitais e análises automatizadas para um monitoramento e gestão florestal mais eficazes. Por se tratar de um estudo comparativo pioneiro utilizando o software *Arboreal Tree*, não foram encontrados registros de pesquisas anteriores que possam corroborar os dados obtidos neste estudo.

Para obter uma melhor comparação com o software *Arboreal Tree*, os dados foram processados utilizando a equação ajustada selecionada na Tabela 6, sendo a equação escolhida a Curtis². Dessa forma, foi possível analisar a precisão dos dados do software através da relação hipsométrica (Figura 11):

Figura 11 - Análise da precisão dos dados do software *Arboreal Tree* através da relação hipsométrica.





Fonte: Autora (2024).

Em que: H estimado real (altura medida de forma convencional), em função do DAP obtido pelo software *Arboreal Tree* (a);

h estimado do software *Arboreal Tree*, em função do D real (diâmetro medido de forma convencional) (b);

h estimada do software *Arboreal Tree*, em função ao D obtido pelo software *Arboreal Tree* (c);

H estimado real (altura medida de forma convencional), em função do D real (diâmetro medido de forma convencional) (d).

Os valores do coeficiente de determinação (R^2) nos gráficos indicam uma forte correlação entre as variáveis analisadas, com $R^2 = 0,9063$ (Figura 11a), $R^2 = 0,8781$ (Figura 11b), $R^2 = 0,8911$ (Figura 11c) e $R^2 = 0,906$ (Figura 11d). Isso sugere que a maior parte da variação nas alturas estimadas pode ser explicada pelo diâmetro a 1,30 m do solo (D) mensurado, seja pelo método convencional ou pelo software *Arboreal Tree*, demonstrando a eficácia do software em capturar a relação hipsométrica entre a altura das árvores e seu diâmetro.

O Erro Médio Quadrático (RMSE) é baixo em todos os gráficos, com RMSE = 0,12 m (Figura 11a), RMSE = 0,11 m (Figura 11b), RMSE = 0,14 m (Figura 11c) e RMSE = 0,12 m (Figura 11d). Esses baixos valores indicam que as previsões de altura do software *Arboreal Tree* são precisas, com discrepâncias mínimas entre as medições reais e estimadas, reforçando a confiabilidade do software.

Na Figura 11a, a alta correlação ($R^2 = 0,9063$) e o baixo RMSE (0,12 m) indicam que o software é muito preciso na estimativa da altura real das árvores a partir do D medido pelo próprio software, validando sua eficiência e precisão no campo.

Na Figura 11b, com um R^2 de 0,8781 e um RMSE de 0,11 m, fica claro que as estimativas de altura do software são altamente confiáveis, mesmo quando o D é medido manualmente, destacando a versatilidade do software.

Na Figura 11c, o R^2 de 0,8911 e o RMSE de 0,14 m mostram uma boa consistência interna entre os dados de diâmetro (D) e as alturas (H) estimadas quando ambos são medidos pelo software *Arboreal Tree*, sugerindo que o uso completo do software é uma abordagem robusta e confiável.

Na Figura 11d, a forte correlação ($R^2 = 0,906$) e o baixo RMSE (0,12 m) entre os dados de diâmetro (D) mensurados manualmente e as alturas (H) reais reforçam a precisão do método tradicional, validando as medições do software e servindo como uma linha de base para comparar a eficácia dos métodos automatizados com os manuais tradicionais.

Com base na precisão dos dados obtidos na relação hipsométrica, é evidenciado que o modelo utilizado apresenta dados confiáveis para estimar as variáveis com base da leitura do software, apresentando um R^2 acima de 0,8 que, segundo Assmann (1970), indica que é possível fazer previsões confiáveis da altura com base no diâmetro da árvore.

O *Arboreal Tree* tem a finalidade de coleta de dados 100% por ele, sendo assim um software promissor para o uso em plantios florestais como uma ferramenta inovadora, onde se é possível coletar dados dendrométricos com o uso apenas do Iphone permitindo dados em tempo real e com precisão, diminuindo equipamentos em campo e o tempo em relação à forma convencional de medição.

Ao avaliar a usabilidade, precisão e melhor obtenção de dados entre os softwares *FlorestScanner* e *Arboreal Tree*, foi notável a viabilidade de ambos no contexto de medições e não sendo necessário nenhuma pós-análise. Por outro lado, o software *Arboreal Tree* se destacou pela coleta completa dos dados (altura e diâmetro) quando o *ForestScanner* fica registrado apenas na coleta de diâmetros.

Com a utilização do sensor LiDAR nos softwares, é possível obter dados precisos e detalhados, permitindo as análises de variáveis dendrométricas com alta precisão. Essas informações podem ser utilizadas para tomada de decisão em relação ao manejo florestal. No contexto dos estudos de Murtiyoso *et al.* (2021) e Gollob *et al.* (2021) enriquece a compreensão do potencial do LiDAR em dispositivos Apple para aplicações diversas, dentre elas, o uso no manejo florestal.

Dessa forma, os resultados encontrados reforçam a conclusão de que a utilização do Iphone 13 Pro com a tecnologia do sensor LiDAR juntamente com os softwares *Arboreal Tree* e *FlorestScanner*, pode solucionar problemas relacionados à falta de dados precisos e acurados sobre a estrutura da floresta em áreas remotas e de difícil acesso além de possibilitar a coleta simultânea de informações sobre múltiplas variáveis dendrométricas de forma econômica e eficiente. Com isso, torna-se importante o incentivo a estudos sobre o uso dessa tecnologia.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As análises dos resultados da coleta de dados revelaram uma semelhança notável entre as medições realizadas de forma convencional e as estimativas obtidas com os softwares Arboreal Tree e FlorestScanner utilizados no estudo. A comparação entre os softwares não apresentou uma diferença estatística considerável. No entanto, ao avaliar as funcionalidades de cada um, observou-se que o FlorestScanner fornece apenas os dados de diâmetro (D), enquanto o Arboreal Tree é mais adequado para o inventário florestal, pois consegue coletar as variáveis dendrométricas importantes, como altura (H) e diâmetro (D). O Arboreal Tree demonstrou ser eficiente em substituir qualquer instrumento convencional utilizado em campo, como fita métrica, suta e hipsômetro. Já o FlorestScanner apresentou a necessidade de utilização de uma trena para auxiliar na coleta dos dados. Os principais desafios encontrados com a utilização dos softwares foram a necessidade de boa luminosidade no dia da coleta (sem nuvens) para uma melhor leitura do sensor LiDAR.

É necessário realizar uma análise mais aprofundada e comparações em plantios de diferentes densidades para obter dados mais detalhados, que possam oferecer um parâmetro de amplitude de uso para o software Arboreal Tree. Com base nos dados obtidos neste estudo, foi possível concluir que a utilização de uma tecnologia como o sensor LiDAR em smartphones iOS ressalta a importância dos avanços tecnológicos nas práticas convencionais de mensuração florestal. Essa tecnologia permite a coleta simultânea de informações sobre múltiplas variáveis dendrométricas, o que resolve problemas relacionados à falta de eficiência na coleta de dados. Isso atende ao mesmo tempo as demandas de tempo e custo da coleta de dados em campo, tornando o uso do LiDAR uma alternativa econômica e eficiente para a obtenção de informações.

Espera-se que os resultados obtidos possam contribuir para a utilização mais ampla do sensor LiDAR em smartphones iOS na análise de variáveis dendrométricas em áreas florestais, permitindo uma maior eficiência na gestão e no gerenciamento de recursos florestais.

REFERÊNCIAS

APPIAH, M.; BLAY, D.; DAMNYAG, L.; DWOMOH, F.; PAPPINEN, A.; LUUKKANEN, O. Dependence on forest resources and tropical deforestation in Ghana. **Environment, Development and Sustainability**, v. 11, p. 471-487, 2009. DOI: 10.1007/s10668-007-9125-0.

AGYEMAN, V. K.; SWAINE, M. D.; THOMPSON, J. Respostas de mudas de árvores de florestas tropicais à irradiância e a derivação de um índice de resposta à luz. **Journal of Ecology**, v. 87, p. 815-827, 1999. DOI: 10.1046/j.1365-2745.1999.00400.x.

ASCHOFF, T.; SPIECKER, H. Algorithms for the automatic detection of trees in laser scanner data. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 36, n. 8, p. W2, 2004.

ASCHOFF, T.; THIES, M.; SPIECKER, H. Describing forest stands using terrestrial laser-scanning. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 35, n. 5, p. 237-241, 2004.

ASSMANN, E. **Principles of forest yield study: Studies in the organic production, structure, increment and yield of Forest Stnds.** 1970.

ÇAKIR, G. Y. et al. 3D LiDAR scanning of urban forest structure using a consumer tablet. **Urban Science**, v. 5, n. 4, p. 88, 2021.

CRESPO-PEREMARCH, P.; TOMPALSKI, P.; COOPS, N. C.; RUIZ, L. Á. Characterizing understory vegetation in Mediterranean forests using full-waveform airborne laser scanning data. **Remote Sensing of Environment**, v. 217, p. 400-413, 2018.

CUNHA, U. L. S. **Dendrometria e inventário florestal.** 61 p, 2004.

CURTIS, R. Height-diameter and height-diameter-age equations for second-growth Douglas-fir. **Forest Science**, v. 13, n. 4, p. 365-375, 1967.

DAHLE, F.; ARROYO, O. K.; AGUGIARO, G.; BRIELS, S. Automatic change detection of digital maps using aerial images and point clouds. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 43, p. 457-464, 2021.

DA SILVA, R. B. G. **Inteligência artificial aplicada à ciência florestal**. 2023. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, 2023. v. 2, p. 129-143.

DANDOIS, J. P. et al. What is the point? Evaluating the structure, color, and semantic traits of computer vision point clouds of vegetation. **Remote Sensing**, v. 9, n. 4, p. 355, 2017.

DASSOT, M.; CONSTANT, T.; FOURNIER, M. The use of terrestrial LiDAR technology in forest science: Application fields, benefits and challenges. **Annals of Forest Science**, v. 68, n. 5, p. 959-974, 2011.

D'OLIVEIRA, M. V. N.; FIGUEIREDO, E. O.; PAPA, D. de A. Uso do LIDAR como ferramenta para o manejo de precisão em florestas tropicais. **Embrapa Acre-Livro Técnico**, v. 132, p. 1-132, 2014.

FARIDHOUSEINI, A.; MIANABADI, A.; BANNAYAN, M.; ALIZADEH, A. Lidar remote sensing for forestry and terrestrial applications. **International Journal of Applied Environmental Sciences**, v. 6, p. 103-118, 2011.

FASSNACHT, F. E. et al. Review of studies on tree species classification from remotely sensed data. **Remote Sensing of Environment**, v. 186, p. 64-87, 2016.

FINGER, C. A. G. **Fundamentos de biometria florestal**. Santa Maria, RS: UFSM/CEPEF/FATEC, 1992. 269 p.

GIONGO, M.; KOEHLER, H. S.; MACHADO, S. A.; KIRCHNER, F. F.; MARCHETTI, M. LIDAR: princípios e aplicações florestais. **Pesquisas Florestais Brasileira**, Colombo, v. 30, n. 63, p. 231-244, 2010.

GOLLOB, C. et al. Measurement of forest inventory parameters with Apple iPad Pro and integrated LiDAR technology. **Remote Sens**, v. 13, p. 3129, 2021.

JACKSON, C. M.; ADAM, E. Remote sensing of selective logging in tropical forests: current state and future directions. **iForest - Biogeosciences and Forestry**, v. 13, n. 4, p. 286, 2020.

JASKIERNIAK, D. et al. Individual tree detection and crown delineation from Unmanned Aircraft System (UAS) LiDAR in structurally complex mixed species eucalypt forests. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 171, p. 171-187, 2021.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos, 2009. 598 p.

KHOSRAVIPOUR, A.; SKIDMORE, A. K.; ISENBURG, M.; WANG, T.; HUSSIN, Y. A. Generating pit-free canopy height models from airborne lidar. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 80, n. 9, p. 863-872, 2014.

KING, F.; KELLY, R.; FLETCHER, C. G. Evaluation of lidar-derived snow depth estimates from the iPhone 12 Pro. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 19, p. 1-5, 2022.

KÖTZ, B. **Estimativa de propriedades biofísicas e bioquímicas em copas de vegetação heterogêneas: modelagem de transferência radiativa em copas florestais com base em espectrometria de imagem e LiDAR**. Tese (Doutorado) – Universidade de Zurique, 2006.

LUETZENBURG, G.; KROON, A.; BJØRK, A. A. Evaluation of the Apple iPhone 12 Pro LiDAR for an application in geosciences. **Sci. Rep.**, v. 11, p. 22221, 2021.

MEDEIROS, R. M. et al. Classificação climática de Köppen na zona da mata pernambucana-Brasil. **RECIMA21**, v. 2, n. 5, p. 2675-6218, 2021.

MOKRS, M. et al. Novos sistemas de mapeamento móvel de baixo custo para inventários florestais como alternativas de digitalização terrestre a laser. **Internacional J. Appl. Terra Obs. Geoinf**. 2021.

MURTIYOSO, A.; GRUSSENMEYER, P.; LANDES, T.; MACHER, H. First assessments into the use of commercial-grade solid state lidar for low cost heritage documentation. **Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.** v. XLIII-B2-2, p. 599-604, 2021.

OLIVEIRA, M. L. R. **Mensuração e modelagem do crescimento e da produção de povoamento não-desbastados de clones de eucalipto**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007. 119 p.

OLIVEIRA, X.; RIBEIRO, A.; FERRAZ, A. F.; MAYRINCK, R.; LIMA, R. D.; SCOLFORO, J. Volume equations for *Khaya ivorensis* A. Chev. plantations in Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, 2018. DOI: 10.1590/0001-3765201820170852.

OFORI, D. A.; COBBINAH, J. R.; KELLY, B. A. Performance of African mahogany (*Khaya ivorensis*) provenances in a progeny trial in Ghana. **New Forests**, v. 33, n. 3, p. 313-330, 2007. DOI: 10.1007/s11056-006-9033-7.

ORWA, C.; MUTUA, A.; KINDT, R.; JAMNADASS, R.; SIMONS, A. **Agroforestry Database: A Tree Reference and Selection Guide**, version 4.0. Nairobi, KE: World Agroforestry Centre ICRAF, 2009.

ROSETTE, J.; SUÁREZ, J.; NELSON, R.; LOS, S.; COOK, B.; NORTH, P. R. J. LiDAR remote sensing for biomass assessment. 2012. DOI: 10.5772/17479.

SANDIM, A. et al. New technologies for expedited forest inventory using smartphone applications. **Forests**, v. 14, n. 8, p. 1553, 2023.

SIMONSE, M.; ASCHOFF, T.; SPIECKER, H.; THIES, M. Automatic determination of forest inventory parameters using terrestrial laser scanning. In: Proceedings of the ScandLaser Scientific Workshop on Airborne Laser Scanning of Forests. Umeå: Sveriges Lantbruksuniversitet, 2003. p. 252-258.

SOARES, C. P. B.; PAULA NETO, F.; SOUZA, A. L. **Dendrometria e inventário florestal**. 2. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2011. 272 p.

TAVANI, S. et al. Modelo fotogramétrico 3D via sensor GNSS de smartphone: fluxo de trabalho, estimativa de erros e melhores práticas. **Sensor Remoto**, 2020.

TATSUMI, S.; YAMAGUCHI, K.; FURUYA, N. ForestScanner: A mobile application for measuring and mapping trees with LiDAR-equipped iPhone and iPad. **Methods in Ecology and Evolution**, p. 1603-1609, 2022.

VILLASANTE, A.; FERNANDEZ, C. Measurement errors in the use of smartphones as low-cost forestry hypsometers. **Silva Fennica**, v. 48, n. 5, p. 11, 2014.

WANG, Y. et al. Is field-measured tree height as reliable as believed – A comparison study of tree height estimates from field measurement, airborne laser scanning and terrestrial laser scanning in a boreal forest. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 147, p. 132-145, 2019.

WHITE, J. C. et al. Remote sensing technologies for enhancing forest inventories: A review. **Remote Sensing**, v. 42, n. 5, p. 619-641, 2016.

YAMAMOTO, M. K. et al. Desenvolvimento de uma aplicação SIG Web e Mobile para o planejamento e a coleta de dados de inventário florestal. 2017.

ZEYBEK, M.; VATANDAŞLAR, C. An automated approach for extracting forest inventory data from individual trees using a handheld mobile laser scanner. **Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering**, v. 42, n. 3, p. 515-528, 2021.

ZHONG, L. et al. Segmentation of individual trees from TLS and MLS data. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 10, n. 2, p. 774-787, 2016.