



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO *DEL-REI*
PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE GRADUAÇÃO
BACHARELADO EM ENGENHARIA FLORESTAL
CAMPUS SETE LAGOAS

ANNE LAURA DA SILVA

**Estimativa de volume por sortimento em plantações de *Pinus taeda* L.
usando dados GEDI**

Sete Lagoas, MG

2021

ANNE LAURA DA SILVA

**Estimativa de volume por sortimento em plantações de *Pinus taeda* L.
usando dados GEDI**

Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal de São João del-Rei, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Florestal.

Orientador: Carine Klauberg Silva

Coorientador: Carlos Alberto Silva

Sete Lagoas, MG

2021

ANNE LAURA SILVA

**Estimativa de volume por sortimento em plantações de *Pinus taeda* L.
usando dados GEDI**

Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal de São João del-Rei, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Florestal.

Sete Lagoas, 14 de julho de 2021.

Banca avaliadora:

Dra. Carine Klauberg Silva, Orientadora — Universidade Federal de São João del Rei

Dr. Carlos Alberto Silva, Coorientador - Universidade da Flórida

Dr. Gustavo E. Marcatti — Universidade Federal de São João del Rei

Msc. Rodrigo Vieira Leite – Universidade Federal de Viçosa

AGRADECIMENTOS

Agradeço,

a Deus por essa dádiva de transformar meu sonho em realidade;

aos meus pais, pelo amor, carinho e paciência ao longo desses anos, sem eles não seria possível alcançar o que tanto sonhei;

meus professores, especialmente a minha orientadora Carine Klauberg Silva, por todo apoio, sabedoria, confiança e auxílio em todos os momentos, tens minha gratidão e consideração.

ao meu coorientador, Carlos Alberto Silva por me ter proporcionado tantos ensinamentos e por sempre acreditar em mim como profissional;

ao professor Gustavo Eduardo Marcatti, que me apresentou as geotecnologias, o qual serei eternamente grata por todos os ensinamentos e pela paciência;

a professora Marina Donária Chaves Arantes, por todas as oportunidades, todo carinho e empatia ao longo desta jornada, serei eternamente grata por tudo;

ao Rodrigo, por todo apoio e paciência durante esse período;

ao meu namorado, Lucas, e sua família, por todo amor e apoio incondicional em todos os momentos;

a toda minha família e amigos, por compartilharem comigo todos os momentos.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALS	<i>Airborne Laser Scanner</i>
CHM	Modelo Digital de Altura de Copa
COV	Fração da cobertura de copa
DAP	Diâmetro a altura do peito
DEM	Modelo Digital de Elevação
DSM	Modelo Digital da Superfície
DTM	Modelo Digital do Terreno
FHD	Densidade da altura da folhagem
GEDI	<i>Global Ecosystem Dynamics Investigation</i>
GPS	Sistema de Posicionamento Global
Ht	Altura Total
IMU	Unidade de medição inercial
LIDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
MAE	Erro médio absoluto
R²	coeficiente de determinação
RF	<i>Random Forest</i>
RH	Altura relativa
RH98	Altura em que 98% da energia retornada é registrada
RMSE	Raiz quadrada do erro quadrático médio
Vcl	Volume de celulose
Vco	Volume comercial
Vt	Volume total

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1.	Lidar (<i>light detection and ranging</i>)	12
2.1.1.	Aplicações do lidar no setor florestal	15
2.2.	GEDI.....	16
2.2.1.	Aplicações GEDI	18
3	MATERIAIS E MÉTODOS	20
3.1.	Descrição da área de estudo.....	20
3.2.	Coleta de dados em campo	20
3.3.	Aquisição dos dados lidar	22
3.4.	Dados GEDI simulados	22
3.6.	Desenvolvimento e avaliação dos modelos <i>Random Forest</i>	23
4	RESULTADOS	25
5	DISCUSSÃO	28
6	CONCLUSÃO.....	30
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	31
	Termo de autorização para publicação no Repositório Institucional da UFSJ	35

RESUMO

O desenvolvimento de novas tecnologias no setor florestal promove inúmeros benefícios no ciclo produtivo. O sensoriamento remoto pode auxiliar significativamente nas atividades de manejo florestal e coleta de dados em campo, tornando a atividade menos onerosa e informações de produtividade a nível de paisagem. O presente estudo teve como objetivo utilizar dados GEDI simulados para estimar o Volume Total, Volume Comercial e Volume de Celulose em plantios comerciais de *Pinus taeda* L. no sul do Brasil. Foram utilizados as métricas provenientes de dados GEDI simulados a partir de dados lidar aerotransportado (ALS) e uma ferramenta de aprendizado de máquina denominada *Random Forest*. Três principais métricas foram definidas para explicar a variação de volume na floresta de *Pinus taeda*: a cobertura de copa, diversidade da altura de copa e altura relativa no percentil 98. A predição do volume total, comercial e de celulose apresentou, respectivamente, R^2 de 0,96, 0,96 e 0,95; bias de 0,24%, 0,31% e 0,17% e RMSE de 10,15%, 11,09%, e 10,18%. A metodologia utilizada no estudo demonstra a aplicabilidade dessa tecnologia em plantios florestais para monitorar e estimar o volume de madeira total e de sortimentos.

Palavras-chave: GEDI. Inventário Florestal. Sensoriamento Remoto.

ABSTRACT

The development of new technologies in the forestry sector promotes countless benefits in the production cycle. Remote sensing can assist in forest management activities and field data collection, making the activity less costly and productivity information at the landscape level. The present study aimed to use simulated GEDI data to estimate the Total Volume, Commercial Volume and Cellulose Volume in commercial *Pinus taeda* L. plantations in southern Brazil. We used as metrics from GEDI data simulated from airborne laser scanner (ALS) and a machine learning tool called Random Forest. Three main metrics were defined to explain the volume variation in the *Pinus taeda* forest: canopy cover, crown height diversity and relative height at the 98th percentile. The prediction of total, commercial and pulp volume presented, respectively, R^2 of 0.96, 0.96 and 0.95; bias of 0.24%, 0.31% and 0.17% and RMSE of 10.15%, 11.09%, and 10.18%. The methodology used in the study demonstrates the applicability of this technology in forest plantations to monitor and estimate the volume of total wood and assortments.

Key words: Forest Inventory. GEDI. Remote Sensing.

1 INTRODUÇÃO

As florestas plantadas são compostas por árvores em uma mesma classe de idade e dispostas em espaçamento regular (FAO, 2020). Estas ocupam uma área de 290 milhões de hectares, correspondendo a 7% da área global (FAO, 2020). Através do manejo sustentável, elas são capazes de reduzir impactos ambientais, o desmatamento de florestas nativas, e diminuir a emissão de gases de efeito estufa, além de preservar o solo e recursos hídricos (IBÁ, 2017).

O Brasil possui 9 milhões de hectares de florestas plantadas (IBÁ, 2020). Deste total, aproximadamente 18% representam os plantios de *Pinus* spp., que em sua maioria estão localizados na região sul do país, sendo o Paraná o principal estado produtor de *Pinus taeda* L., que é a espécie mais plantada na região (IBÁ, 2020). Essa espécie tem grande potencial de crescimento no sul do país, característico pelo clima temperado, devido ao seu elevado incremento médio anual (IMA) de aproximadamente 31 m³/ha/ano (KÖHLER et al., 2014; IBÁ, 2020). A madeira de *Pinus taeda* é comumente destinada para usos múltiplos, dentre eles, a produção de madeira serrada, celulose, laminados e carvão. Para produção de madeira serrada e celulose, a madeira pode ser dividida em diferentes sortimentos para destinar sua utilização e posteriormente definir seu valor econômico (KÖHLER et al., 2014).

A produção madeireira dependerá do manejo florestal e dentro desse processo temos a mensuração florestal. A mensuração florestal é uma etapa importante da produção madeireira, pois nela se estima o volume de madeira presente na floresta antes do processo de exploração. Geralmente, as empresas florestais conduzem seus inventários anualmente para monitorar o crescimento da floresta, de modo a identificar condições problemáticas como ataque de pragas e condições adversas de crescimento na floresta, além de prever o tempo de colheita (SILVA et al., 2016). A estimativa do volume total, comercial e de celulose é baseada em equações volumétricas que necessitam de variáveis dendrométricas como diâmetro a altura do peito (DAP – 1,3 m) e altura para serem ajustadas. Porém, a coleta de dados em campo é uma atividade onerosa, pois necessita de mão-de-obra e elevado número de parcelas em campo para obter menor erro no inventário florestal (SILVA et al., 2016). Apesar de ser o método mais comumente utilizado, trata-se de amostragem, portanto, nem todos os indivíduos são mensurados, podendo gerar estimativas tendenciosas dependendo de onde as parcelas são alocadas.

Como aliada à mensuração florestal, as tecnologias de sensoriamento remoto podem ser utilizadas para estimar métricas da floresta de forma mais precisa e acurada, além de estimar a

variável de interesse a nível de paisagem. Desta forma, a tecnologia lidar (*Light Detection and Ranging*) tem se mostrado ser uma alternativa eficiente para realização do inventário florestal em larga escala e com alta precisão (PEARSE et al., 2018). O lidar é um sensor remoto ativo que emite pulsos laser para estimar a distância entre objetos (JENSEN, 2007). Os dados lidar fornecem informações de alta resolução em três dimensões (3D), além de detalhes do relevo, de bacias hidrográficas, estradas e do dossel florestal (HUDAK, 2008). Através de dados lidar, é possível estimar a área basal, volume total e volume comercial da floresta (SILVA et al., 2017; HUDAK et al., 2006; SILVA et al., 2020; SILVA et al., 2016; SILVA et al., 2014.). Recentemente, a Agência Espacial Norte Americana (NASA) lançou um lidar orbital denominado GEDI, do inglês “*Global Ecosystem Dynamics Investigation*” (DUBAYAH et al., 2020). O GEDI é um sensor que utiliza pulsos laser de resolução média (~25m) para obter a estrutura tridimensional de objetos presentes na superfície terrestre. Essa caracterização permite a obtenção de medidas precisas quanto à altura do dossel da floresta, juntamente com a elevação do terreno, auxiliando na tomada de decisões e na preservação de ecossistemas naturais (DUBAYAH et al., 2020).

O GEDI fornece informações de estrutura vertical da floresta, as quais podem ser processadas para estimar e monitorar a biomassa arbórea florestal. Um estudo recente mostrou que métricas da estrutura da floresta, como altura e cobertura de copa, derivadas do GEDI podem ser utilizadas para estimativa da altura e volume total em plantações de *P. teada* no Brasil (SILVA et al., 2019). Entretanto, nenhum estudo foi realizado com objetivo de avaliar o potencial do GEDI para obtenção de métricas da floresta e posteriores estimativas de volume de madeira por sortimento, como volume comercial e de celulose em plantações florestais.

Portanto, o objetivo principal deste trabalho consiste em avaliar o potencial da tecnologia GEDI para estimativa do volume em plantações de *P. taeda*. Como objetivos específicos: i) Simular dados GEDI utilizando lidar aerotransportado (*airborne laser scanner* - ALS), ii) Calibrar modelo para a estimativa do volume madeireiro total, comercial e de celulose, iii) Avaliar precisão das estimativas de volume por sortimento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

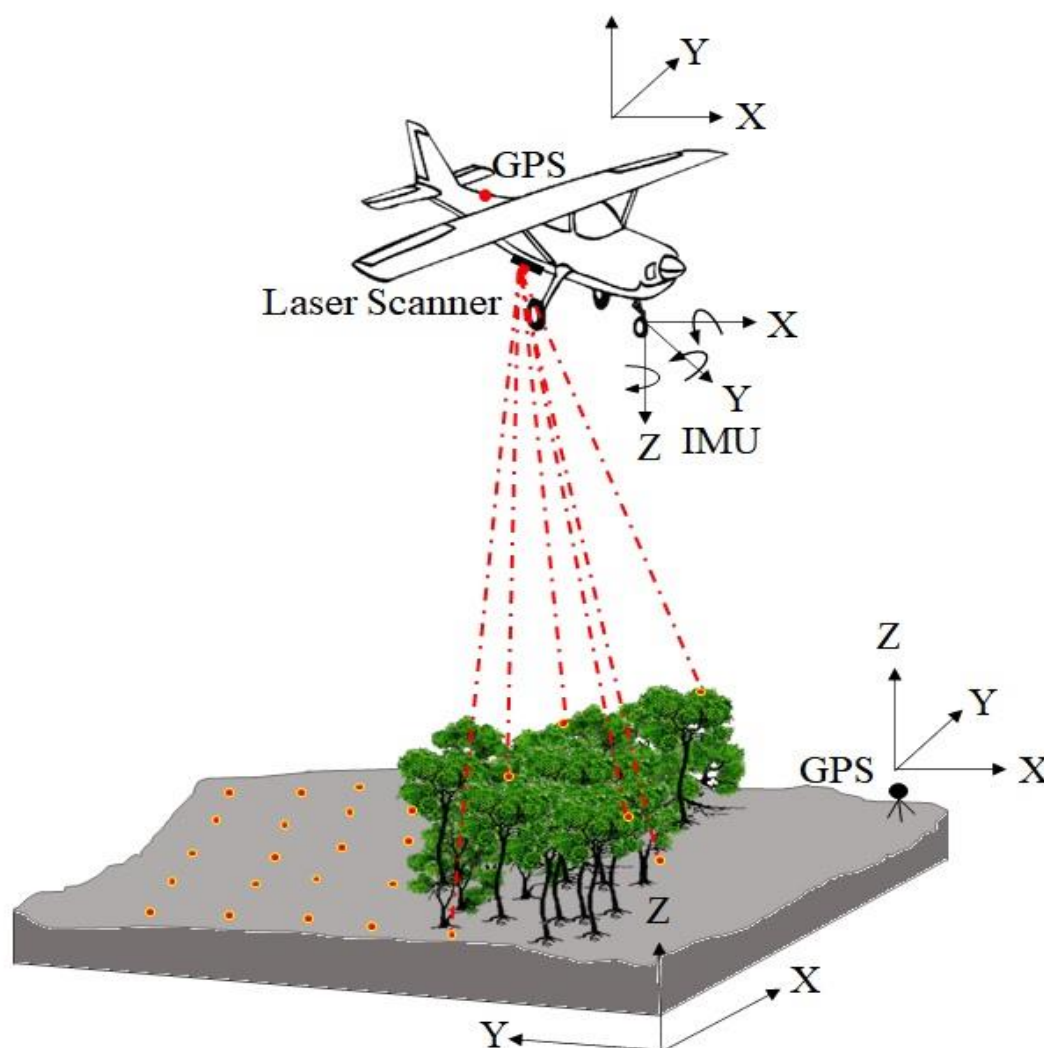
2.1. Lidar (*light detection and ranging*)

O lidar, sigla utilizada para *light detection and ranging*, cuja tradução é detecção e alcance de luz, é uma tecnologia de sensoriamento remoto ativo que mede distâncias ou intervalos baseados no tempo entre a emissão e a recepção dos sinais laser (DONG; CHEN, 2018). A principal vantagem desse sensor remoto ativo está associada ao fato de seus pulsos laser penetrarem por pequenas aberturas do dossel florestal, fornecendo informações precisas sobre a estrutura vertical e o relevo da área (GIONGO et al., 2010).

Os sistemas lidar podem aerotransportados ser divididos quanto a plataforma de levantamento, podendo ser aéreas, terrestres ou orbitais, sendo a plataforma aérea o meio mais utilizado para mensuração florestal (SILVA, 2013). O sistema lidar aerotransportado é denominado ALS (*Airborne laser Scanner*) e de acordo com McGaughey (2016) utiliza quatro equipamentos principais, sendo eles:

- (i) unidade de varredura receptor-emissor laser acoplada à aeronave;
- (ii) sistema de posicionamento global (GPS) na aeronave e no solo;
- (iii) unidade de medição inercial (IMU) conectada ao scanner, que tem como objetivo medir a inclinação, rotação e guinada (*roll, pitch, yaw*) da aeronave;
- (iv) sistema de armazenamento de dados (computador).

Figura 1 - Componentes do sistema lidar aerotransportado.



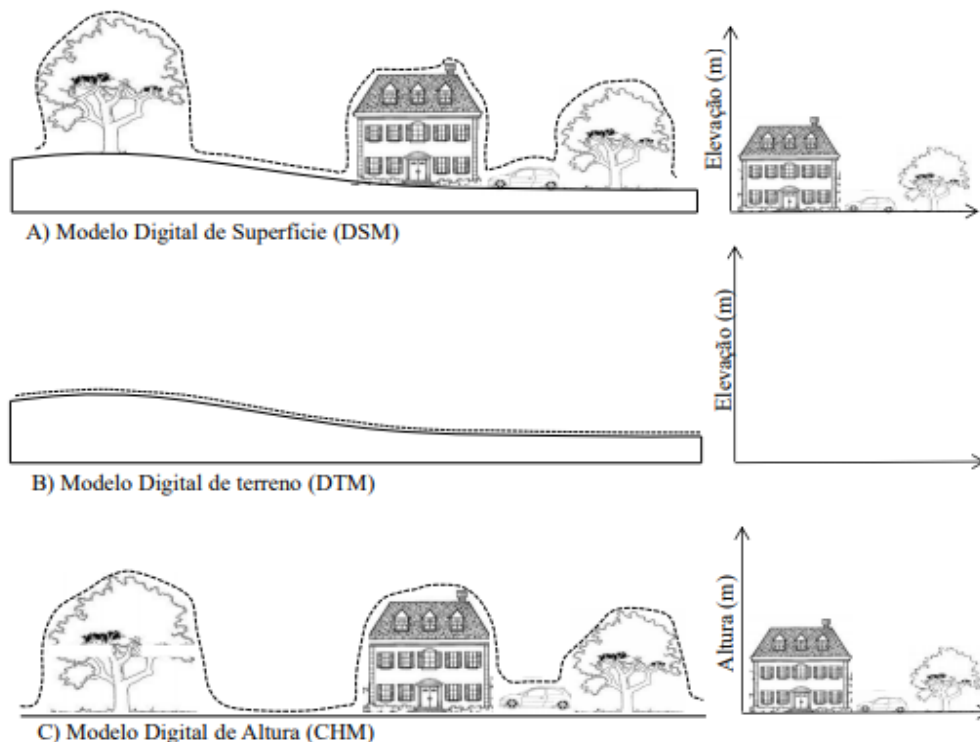
Fonte: Adaptado de McGaughey (2016)

O scanner a laser acoplado na aeronave tem a capacidade de enviar até 200.000 pulsos de luz por segundo para o solo, mensurando o tempo de retorno do pulso até a unidade de medição, e esse tempo é utilizado para calcular a distância que cada pulso percorre entre a aeronave e o objeto (McGAUGHEY, 2016). Inicialmente, os sistemas ALS foram desenvolvidos em sistema de pulsos (*discrete echo*), que registrava o primeiro e o último intervalo de retorno de pulsos (GIONGO et al., 2010). Ao longo da evolução dos sistemas de escaneamento, surgiram os pulsos intermediários, os quais registravam toda energia retornada. Nos últimos anos, surgiram os sistemas de ondas contínuas (*full-waveform*), que registram todo o sinal de pulsos. (GIONGO et al., 2010). O IMU tem a função de obter a velocidade de força angular utilizando uma combinação de giroscópios, acelerômetros e magnetômetros, que irão

auxiliar na correção da posição da aeronave evitando efeitos de arfagem, guinada e rolamento (*roll, pitch, yaw*) (GURA et al., 2017).

Os principais produtos obtidos a partir de dados lidar são modelos digitais de elevação (*digital elevation model* - DEM), intensidade e métricas lidar (SILVA, 2013). Segundo Burrough e McDonnell (1998), o modelo digital de elevação representa matematicamente a distribuição das elevações em um espaço geográfico de referência, agrupando as informações em formato digital adequado. Os modelos digitais de elevação podem ser subdivididos em modelo digital de superfície (*digital surface model* - DSM) e modelo digital do terreno (*digital terrain model* - DTM) e modelo digital de altura de copas (*Canopy Height Models* – CHM). O DSM apresenta informações de elevação de todas as feições da paisagem, tais como vegetação, construções e demais estruturas. Já o modelo digital do terreno representa a superfície desnuda do terreno, sem influência da vegetação ou construções (JENSEN, 2009). O CHM é um DSM com altura normalizada e seus valores na coordenada Z representam a altura real dos objetos (SILVA, 2013). Utilizando o CHM, modelo é possível realizar estudos sobre cobertura do solo em áreas urbanas, bem como a detecção de árvores em uma floresta (HUO et al.; 2018; LEITE et al.; 2020).

Figura 2 - Comparação de diferentes modelos digitais de elevação (DEM). A) Modelo digital de superfície (DSM). B) Modelo digital do terreno (DTM). C) Modelo digital de altura (CHM).



Fonte: SILVA, 2013.

2.1.1. Aplicações do lidar no setor florestal

No início da década de 1980, o serviço florestal canadense demonstrou a aplicabilidade do lidar para estimar alturas de povoamentos florestais, densidade de cobertura de copa e cobertura do solo, e elevação abaixo do dossel florestal (ALFRED; BONNER, 1985).

Os trabalhos utilizando a tecnologia lidar podem se dividir em duas principais vertentes, sendo elas, a estimativa de variáveis dendrométricas a nível de árvore ou a nível de talhão (SILVA et al., 2016). Neste trabalho, serão discutidos métodos de estimativa de variáveis a nível de talhão.

Quando comparada a métodos tradicionais de estimativa de variáveis dendrométricas a nível de talhão, a tecnologia lidar mostra-se estatisticamente eficiente (NAESSET, 2002). Os principais parâmetros biométricos avaliados incluem índice de área foliar (LAI), altura, estimativa de biomassa acima do solo, área basal e volume (QU et al., 2020; SILVA et al., 2020; OLIVEIRA et al., 2020; SILVA et al., 2017).

Um dos precursores no uso de dados lidar para estimar métricas da floresta foi Nilsson (1996), que estimou a altura e o volume de povoamento de *Pinus* sp., cujos resultados apontaram uma certa subestimação dos valores de altura do talhão e resultados satisfatórios do volume total, com coeficiente de determinação (R^2) de 0,78.

Naesset (2002) empregou a metodologia de dois estágios aos dados lidar para estimar diâmetro médio, área basal, densidade, altura média e dominante e volume em florestas da Noruega. O primeiro estágio consiste em executar modelos preditivos para as métricas florestais baseadas em parte da área de estudo. Os modelos apresentaram bons resultados, sendo explicativo na ordem de 39 a 78% nas estimativas de diâmetro médio, 69 a 89% para área basal, 50 a 68% para a densidade de árvores, 80 a 97% para a altura média, 74 a 93% para altura dominante e de 80 a 93% para volume (NAESSET, 2002). No segundo estágio as equações desenvolvidas foram aplicadas para a área total. A precisão dos modelos foi verificada através do desvio padrão entre os valores preditos (segundo estágio) e observados em campo (primeiro estágio). O desvio padrão variou de 0,87 a 1,36 m para a altura média, de 1,27 a 1,54 m para a altura dominante, de 1,66 a 3,2 cm para o diâmetro médio, de 135 a 649 árvores por hectare, para a área basal, variou de 3,63 a 5,64 m² por hectare e por fim, para o volume, o desvio padrão variou de 29,3 a 62 m³ por hectare (NAESSET, 2002).

Hudak et al. (2006) avaliaram a utilidade de dados lidar de retorno discreto e de imagens de satélite multiespectrais para modelagem e mapeamento da área basal e densidade de árvores em florestas de coníferas no centro-norte de Idaho, EUA. Foram aplicados modelos de regressão linear múltipla, com 26 métricas obtidas através de dados lidar e imagens de satélite

multiespectrais. No geral, as métricas derivadas do lidar foram mais eficazes que as métricas derivadas de imagens multiespectrais para predição dos parâmetros biométricos. As variáveis mais explicativas para obtenção da área basal foram altura total, seguida pela intensidade. Já para predição da densidade do dossel florestal, a variável de cobertura de copa foi a mais importante, seguida da intensidade (HUDAK et al., 2002). Os modelos selecionados apresentam poder explicativo em torno de 90% da variabilidade para as variáveis biométricas avaliadas. Portanto, esse estudo demonstra que os atributos da estrutura florestal podem ser modelados com alta precisão através da utilização de dados lidar e imagens multiespectrais.

Hudak et al. (2012) investigaram o uso do lidar aerotransportado de retorno discreto para quantificação da mudança de biomassa e fluxo de carbono. Os dados foram coletados entre 2003 e 2009 numa floresta de coníferas mistas ao norte de Idaho, EUA. O algoritmo *Random Forest* foi utilizado para modelar a biomassa acima do solo. Neste período de 6 anos, houve aumento no incremento de biomassa de 4,1 Mg/ha/ano. Portanto, os resultados obtidos pelos autores sugerem que as pesquisas podem ser úteis para quantificação da biomassa em florestas de coníferas com elevada precisão.

Silva et al. (2018) estimaram as alturas dominantes e médias, além da densidade de árvores em plantios de *Pinus* no sul do Brasil. Os atributos e as métricas derivadas do lidar foram calculadas em 53 parcelas usando modelos de imputação para estimar atributos da floresta nos níveis de parcela e paisagem. As métricas que melhor estimaram altura dominante, altura média e densidade arbórea foram altura no percentil 99 (H99TH), desvio padrão da altura, assimetria da altura, e altura mínima. O modelo de imputação foi mais eficaz para estimar a altura do que a densidade das árvores. Portanto, a imputação de lidar e k- NN podem ser utilizados para estimar altura de povoamentos de *P. taeda* com elevada precisão. A métrica H99TH foi altamente correlacionada para obtenção da altura dominante e média do povoamento.

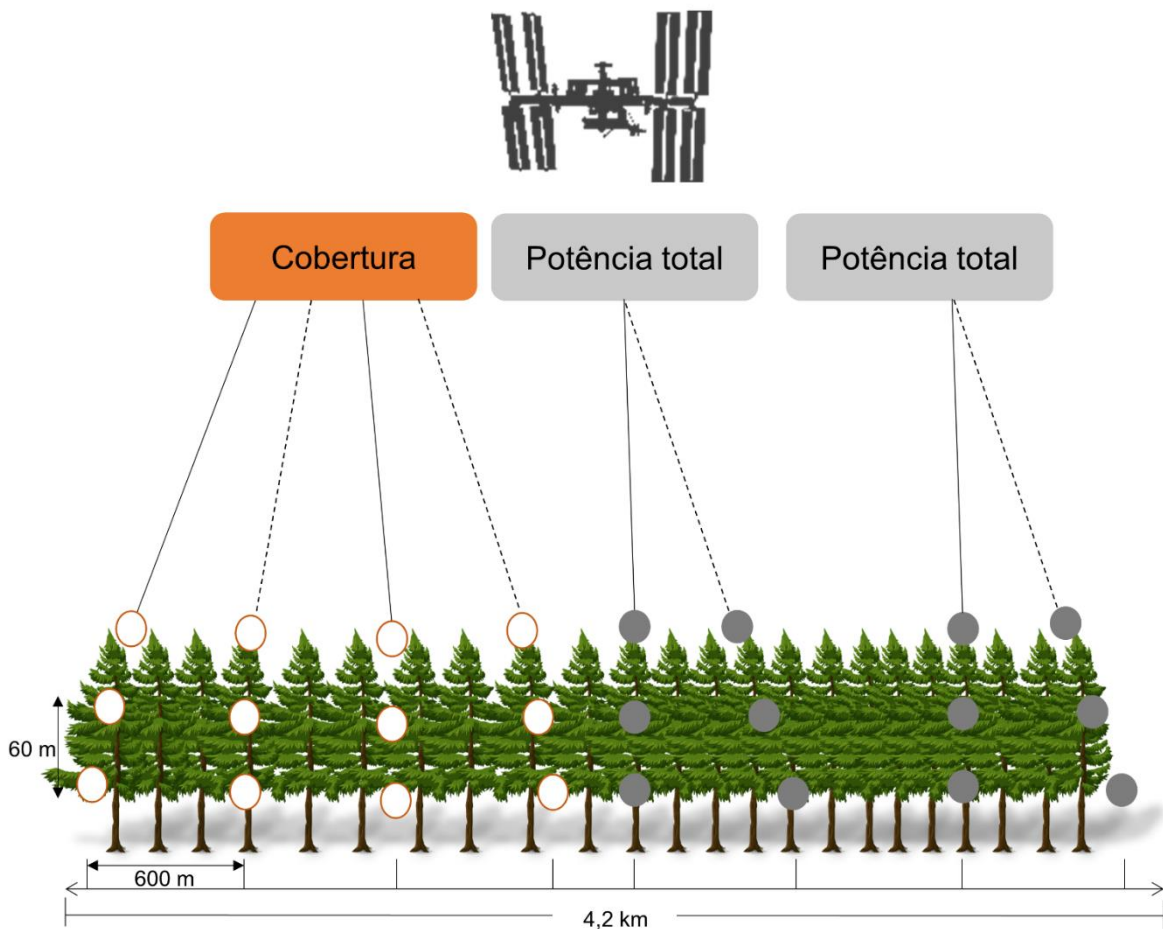
2.2. GEDI

O GEDI (*Global Ecosystem Dynamics Investigation*) foi lançado em 5 de dezembro de 2018 com objetivo de fazer medições da superfície terrestre. Os principais produtos derivados do GEDI incluem elevação do terreno, altura do dossel e densidade da biomassa acima do solo (DUBAYAH et al., 2020). O lidar dessa missão está acoplado ao JEM-EF na Estação Espacial Internacional, e suas medições são realizadas durante todo o dia e noite, continuamente na superfície terrestre entre a latitude 51,6 N e S, cobrindo florestas temperadas e tropicais da Terra.

O princípio de funcionamento do GEDI consiste na emissão de um pulso infravermelho próximo de energia laser, que é disparado em direção à superfície terrestre. O pulso é refletido por folhas e galhos dentro de uma área de 25 metros de diâmetro (*footprint*). A energia retornada é processada para determinar as elevações do solo, e dossel que podem ser processadas para cálculo de métricas da floresta, como a altura relativa (RH) (TANG et al., 2012).

O sistema é composto por três lasers, onde um dos lasers é dividido em dois feixes (feixes de cobertura), e outros dois lasers que são utilizados com potência total, produzindo oito trilhas em que os dados são coletados (DUBAYAH et al., 2020). As trilhas são separadas entre si por cerca de 600 metros, cobrindo uma faixa de aproximadamente 4,2 km (Figura 3). Cada laser dispara aproximadamente 242 vezes por segundo de modo que os centros dos *footprints* são separados por 60 metros na direção da órbita (DUBAYAH et al., 2020). O GEDI utiliza seu próprio sensor GPS, IMU e informações de rastreadores de alta tecnologia, que permitem que o GEDI georreferencie cada pulso laser com precisão de até 10 metros na superfície terrestre (DUBAYAH et al., 2020).

Figura 3 – Princípio de funcionamento do lidar orbital (GEDI).



Fonte: Adaptado de DUBAYAH et al. (2020).

2.2.1. Aplicações GEDI

Duncanson et al. (2020) estimaram a biomassa sobre o condado de Sonoma, na Califórnia, EUA através de simulações derivadas de três missões da NASA, dentre elas, o GEDI, ICESat-2 e NISAR. Neste estudo, os dados derivados da missão GEDI foram simulados a partir da nuvem de pontos do lidar aerotransportado utilizando algoritmo de simulação conforme especificado em Hancock et al. (2019). Cada simulação foi avaliada em comparação com o mapa de referência local em sua resolução original. Os autores encontraram a raiz quadrada do erro médio (*root mean square error* – RMSE) de 57% para as estimativas utilizando dados do GEDI. Portanto, foi possível inferir que a metodologia proposta no estudo fornece orientação para a comparação e validação de estimativas de biomassa florestal com auxílio de mapas de lidar aerotransportado como referência.

Chen et al. (2021) realizaram a junção de dados derivados do GEDI, Sentinel-1 SAR, Sentinel-2 Multispectral e imagens do DSM para modelagem do volume em florestas heterogêneas do nordeste da China. As variáveis obtidas através do lidar foram unidas as imagens de múltiplos sensores reduzindo o erro de 22,08% para 15,21%. As variáveis que melhor explicaram o volume foram a cobertura do dossel, altura das árvores em lidar, elevação da banda L InSAR e índices espectrais de bandas de *red-edge*. Este trabalho, como pioneiro na exploração de dados derivados do GEDI lidar foi capaz de fornecer uma metodologia eficaz para estimar volume em florestas heterogêneas.

Potapov et al. (2021) mapearam a altura do dossel florestal global por meio da integração de dados GEDI e Landsat-OLI. Os dados do Landsat-OLI foram utilizados para extrapolar medições de altura do dossel no nível de *footprint* do GEDI, para criar um mapa de altura de árvores com resolução espacial de 30 metros. Na comparação entre o mapa de altura global da floresta e os dados de validação do GEDI, foi encontrada a raiz quadrada do erro médio (RMSE) de 9,07 metros, enquanto o erro médio absoluto (MAE) foi de 6,36 metros e o coeficiente de determinação (R^2) foi de 0,62%. Portanto, foi observado que a integração de dados GEDI e Landsat-OLI permitiram a estimativa da altura do dossel, sendo de suma importância para o desenvolvimento de iniciativas sustentáveis.

Silva et al. (2021) realizaram a combinação de dados simulados GEDI, ICESat-2 e NISAR para mapear regionalmente a biomassa acima do solo (AGB) na floresta temperada de Sonoma Country, Califórnia, EUA. No estudo, foi comparado o desempenho da fusão quando diferentes combinações de dados GEDI e ICESat-2 AGB são utilizados para comparar modelos regionais de L-band AGB. Como resultado, os autores informam que o AGB médio foi mais preciso quando se utilizou a fusão de dados GEDI e ICESat-2. Quando os dados são utilizados

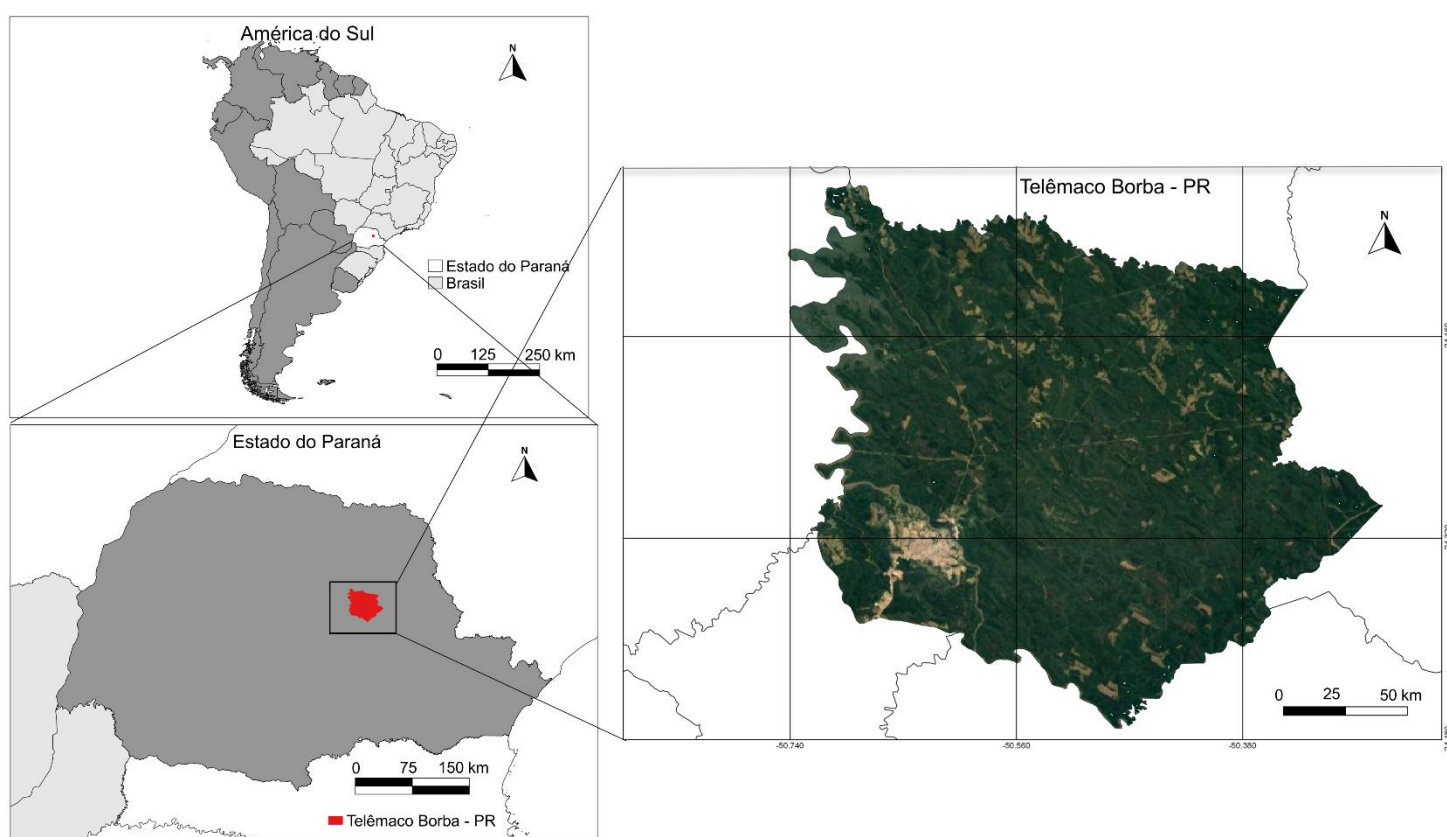
isoladamente, o resultado não foi tão preciso. Entretanto, essa pesquisa trouxe oportunidades para fundir fluxos de dados de sensoriamento remoto ativo de modo a auxiliar em mapeamentos futuros de AGB.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Descrição da área de estudo

A área de estudo consiste em um plantio comercial de *Pinus taeda* no município de Telêmaco Borba, no estado do Paraná. O espaçamento entre árvores é de 3 x 3 m ou 2,5 x 2,5 m, resultando em uma densidade de 1.667 ou 2.000 árvores por hectare, respectivamente. O clima da região é caracterizado como quente e temperado, com precipitação média anual de 1.437 mm e temperatura média anual de 19,3 °C (ALVARES et al., 2014).

Figura 4 - Área de estudo, localizada no município de Telêmaco Borba, estado do Paraná.



3.2. Coleta de dados em campo

As parcelas de inventário estão localizadas num planalto, cujo relevo é relativamente plano. Os plantios dessa espécie são manejados por uma empresa de produção de polpa celulósica e papel. Um total de 50 parcelas retangulares, com aproximadamente 600 m² (20 x 30m) foram alocadas aleatoriamente em uma área de plantio comercial de *P. taeda* para realização do inventário. Desta forma, as parcelas de campo representaram a área de estudo de

maneira significativa, captando a variabilidade estrutural no interior do plantio com suas idades variando entre 45 e 108 meses. Em cada parcela, foi mensurado o diâmetro a 1,3 m do terreno (DAP) de cada árvore. Para mensuração da altura total das árvores, foram medidas as alturas de 15% das árvores foram selecionadas aleatoriamente e tiveram suas alturas medidas. Para as árvores que não tiveram suas alturas determinadas, foram utilizadas equações hipsométricas, na qual o DAP é a variável independente e a altura total (Ht) é a variável dependente, de acordo com o modelo apresentado abaixo:

$$\ln(Ht) = \beta_0 + \beta_1 \times (1/DAP) + e \quad (1)$$

onde $\ln(Ht)$ é o logaritmo natural da altura da árvore (m), β_0 e β_1 são o intercepto e a inclinação do modelo; DAP é o diâmetro a altura do peito (1,30 m); e e é o erro aleatório do modelo.

Para cada árvore, foram computados o volume total (V_t), volume comercial (V_{co}) e volume de celulose (V_{cl}). Para determinação do volume total, toda a árvore foi mensurada, de modo a tomar sua altura e diâmetro para desenvolvimento do modelo volumétrico. Como a empresa utiliza múltiplos produtos, o volume comercial é aquele em que o diâmetro é maior que 18 cm, sendo este, não destinado a produção de polpa celulósica. O volume de celulose é determinado pela porção da árvore com diâmetro inferior a 18 cm. O volume de cada árvore foi determinado pela equação polinomial de quinto grau, conforme apresentada abaixo:

$$\frac{di}{DAP} = \left[\beta_0 + \beta_1 \left(\frac{hi}{h} \right) + \beta_2 \left(\frac{hi}{h} \right)^2 + \beta_3 \left(\frac{hi}{h} \right)^3 + \beta_4 \left(\frac{hi}{h} \right)^4 + \beta_5 \left(\frac{hi}{h} \right)^5 \right] \quad (2)$$

$$V = K \int_{h_1}^{h_2} di^2 \delta h \quad (3)$$

$$V = K DAP^2 \int_{h_1}^{h_2} \left(\beta_0 + \frac{\beta_1}{h} \times h_1^1 + \frac{\beta_2}{h^2} \times h_2^2 + \frac{\beta_3}{h^3} \times h_2^3 + \beta_4 \times h_2^4 + \beta_5 \times h_2^5 \right)^2 \delta h \quad (4)$$

Onde β são os parâmetros a serem estimados, di = diâmetro do fuste (cm) em cada posição, DAP = diâmetro (cm) a altura do peito (1,30 m), h = altura total (m) em cada posição e $K = \pi/40.000$, que é um fator de conversão para o volume em m^3/ha .

O total de todos os volumes somados a nível de parcela e sumarizados para classes de idade estão demonstrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultados dos volumes mensurados (Vt – volume total, Vco – volume comercial, Vcl – volume para celulose) nas 50 parcelas de campo em plantio de *Pinus taeda* L. com relação a idade do plantio (meses)

Idade (meses)	Volume (m ³ /ha) ± Sd			N
	Vt	Vco	Vcl	
46-66	56,15 ± 11,3	44,55 ± 11,46	45,55 ± 11,46	18
67-87	141,3 ± 34,86	131,6 ± 34,6	119,54 ± 26,58	20
88-108	175,76 ± 32,84	166,95 ± 32	122,6 ± 22,5	12
Média ± Sd	118,91 ± 56,57	109,1 ± 57	93,63 ± 41,98	50

N = Número de parcelas; Sd = Desvio padrão

3.3. Aquisição dos dados lidar

Os dados lidar foram obtidos pelo uso do sensor Harrier 68i, acoplado em uma aeronave CESSNA 20. O sensor emite uma frequência de quatro pulsos por metro quadrado, a uma velocidade de voo de 234 km/h, e a área de abrangência do laser (*footprint*) é de aproximadamente 0,33 metros, com acurácia horizontal e de elevação de 10 e 15 cm, respectivamente. A aeronave voou a uma altitude média de 666,17 metros com frequência de varredura de 300 kHz.

3.4. Dados GEDI simulados

Nesse estudo, foram utilizados dados GEDI simulados a partir da *full-waveform* lidar devido ao erro de geolocalização inerente aos dados GEDI, além da diferença temporal entre a coleta de dados em campo (2012) e a disponibilização dos dados GEDI, causando divergência entre os dados.

Os dados lidar na forma da onda completa (*full-waveform*), que são semelhantes ao GEDI, foram simulados utilizando dados ALS através da ferramenta descrita por Hancock et al. (2019) e o processamento com o uso do pacote rLidar (SILVA et al., 2020). A simulação de dados GEDI consiste na transformação da nuvem de pontos lidar com retorno discreto em sinais de forma de onda completa (BLAIRE; HOFTON, 1999) de modo a utilizar a forma da onda completa obtida pelos dados lidar da missão GEDI, além de incluir os ruídos. A relação entre o sinal e os ruídos da forma da onda em dados da missão GEDI depende do tipo de laser que está sendo utilizado, ou seja, se é laser de potência ou de cobertura, assim como o tempo de aquisição da nuvem de pontos (dia ou noite); caso os feixes sejam adquiridos durante o dia, terão maior ruído do que feixes adquiridos durante a noite (HANCOCK et al., 2019). Foram calculados três métricas a partir das formas de onda completa do GEDI simulado conforme apresentado na Tabela 2. A altura relativa (RH) no percentil 98 (RH98, em m), fração da cobertura de copa

(COV, em %) e diversidade da altura da folhagem (FHD, sem unidade). O RH98 representa a altura abaixo da qual 98% da energia do laser retornada é registrada, sendo que essa variável foi utilizada para representar a altura da copa, de modo a evitar ruídos caso fosse selecionado o último retorno da altura relativa (SILVA et al., 2018). O COV está relacionado à área ocupada pela projeção da copa no solo, sendo calculado a partir do sinal Gaussiano de solo ajustado. O FHD caracteriza a densidade da altura da folhagem, expressando a complexidade da estrutura do dossel e sua distribuição vertical. Essas variáveis foram escolhidas por expressarem relações biométricas conforme apresentado em trabalhos que estimam atributos florestais (SILVA et al., 2019; DUNCANSON et al., 2020).

Tabela 2 – Métricas da *full-waveform* utilizadas como variáveis preditoras para estimar o volume madeireiro em plantios de *Pinus taeda* L.

Acrônimo	Descrição
RH98	Altura relativa no percentil 98th
COV	Fração da cobertura de copa (%)
FHD	Diversidade da altura da folhagem (sem unidade)

3.6. Desenvolvimento e avaliação dos modelos *Random Forest*

Primeiramente, foi realizada uma análise exploratória e correlações entre as variáveis preditoras e as variáveis resposta. Em seguida, os três volumes das árvores (V_t , V_{co} e V_{cl}) foram preditos a nível de parcela utilizando o pacote “*randomForest*” (LIAW e WIENER, 2015) no software R (R Core Team, 2020). As estimativas foram avaliadas pelo método de validação cruzada 10-fold. Nesse método, as amostras são separadas em 10 grupos de mesmo tamanho. Um grupo é selecionado para a validação enquanto os demais são utilizados para calibrar o modelo. Esse processo é repetido 10 vezes de forma que cada grupo seja deixado de fora da calibração uma vez. A acurácia das estimativas para cada modelo é avaliada por meio da média das 10 iterações utilizando o coeficiente de determinação (R^2), raiz quadrada do erro médio (RMSE) e bias (absoluto e relativo).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2}{n}} \quad (6)$$

$$RMSE\% = \frac{RMSE}{\bar{Y}} \times 100 \quad (7)$$

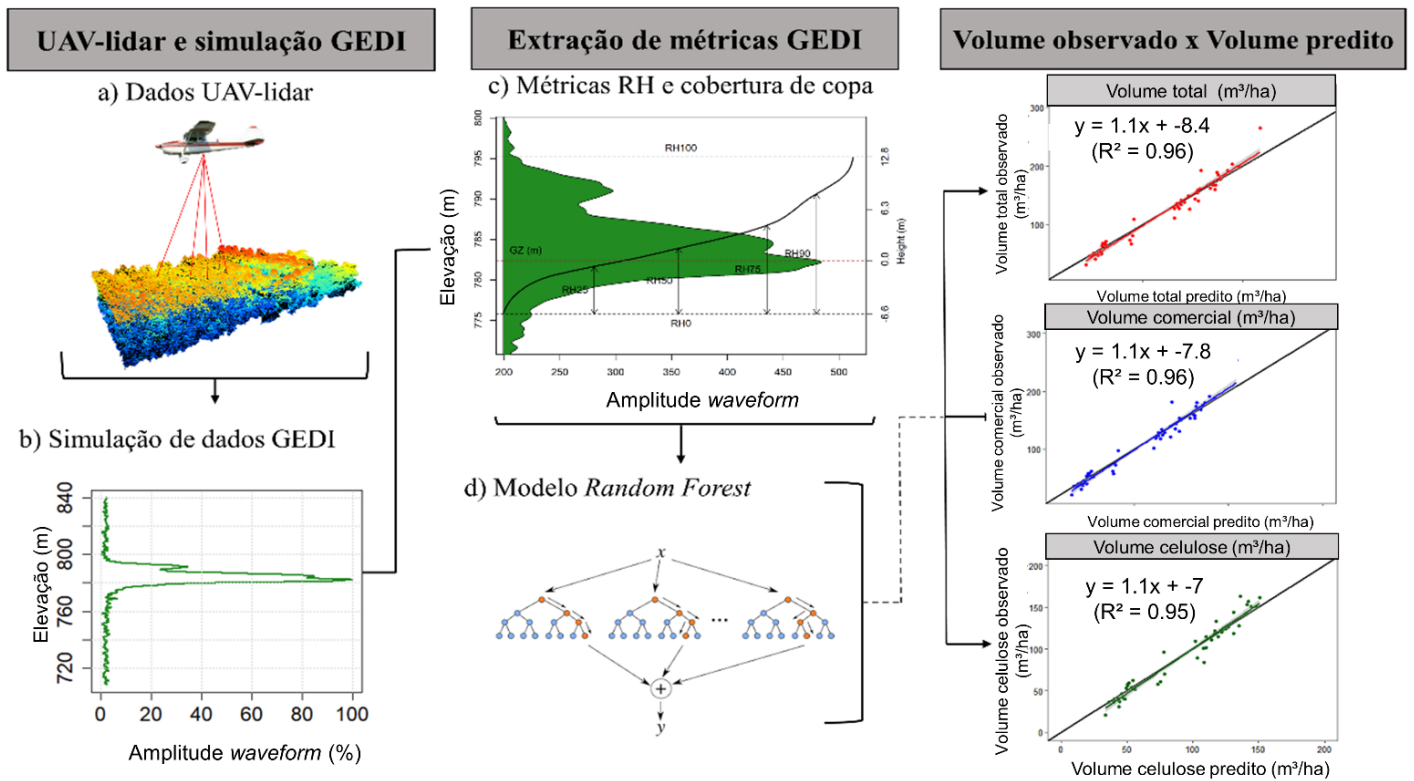
$$bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i) \quad (8)$$

$$bias\% = \frac{bias}{\bar{y}} \times 100 \quad (9)$$

onde n é o número de parcelas, y_i é o valor observado da parcela i , e $\hat{y}_i$ é o valor predito da parcela i , $\bar{y}$ é o valor observado médio. Além disso, RMSE (%) e bias (%) foram calculados pela divisão dos valores absolutos pela média dos volumes observados. De acordo com Silva et al. (2017) e outros estudos publicados (referencia), foi definido que o valor de RMSE e bias sejam menores que 15%.

Um resumo esquemático da metodologia aplicada é apresentado na figura 5.

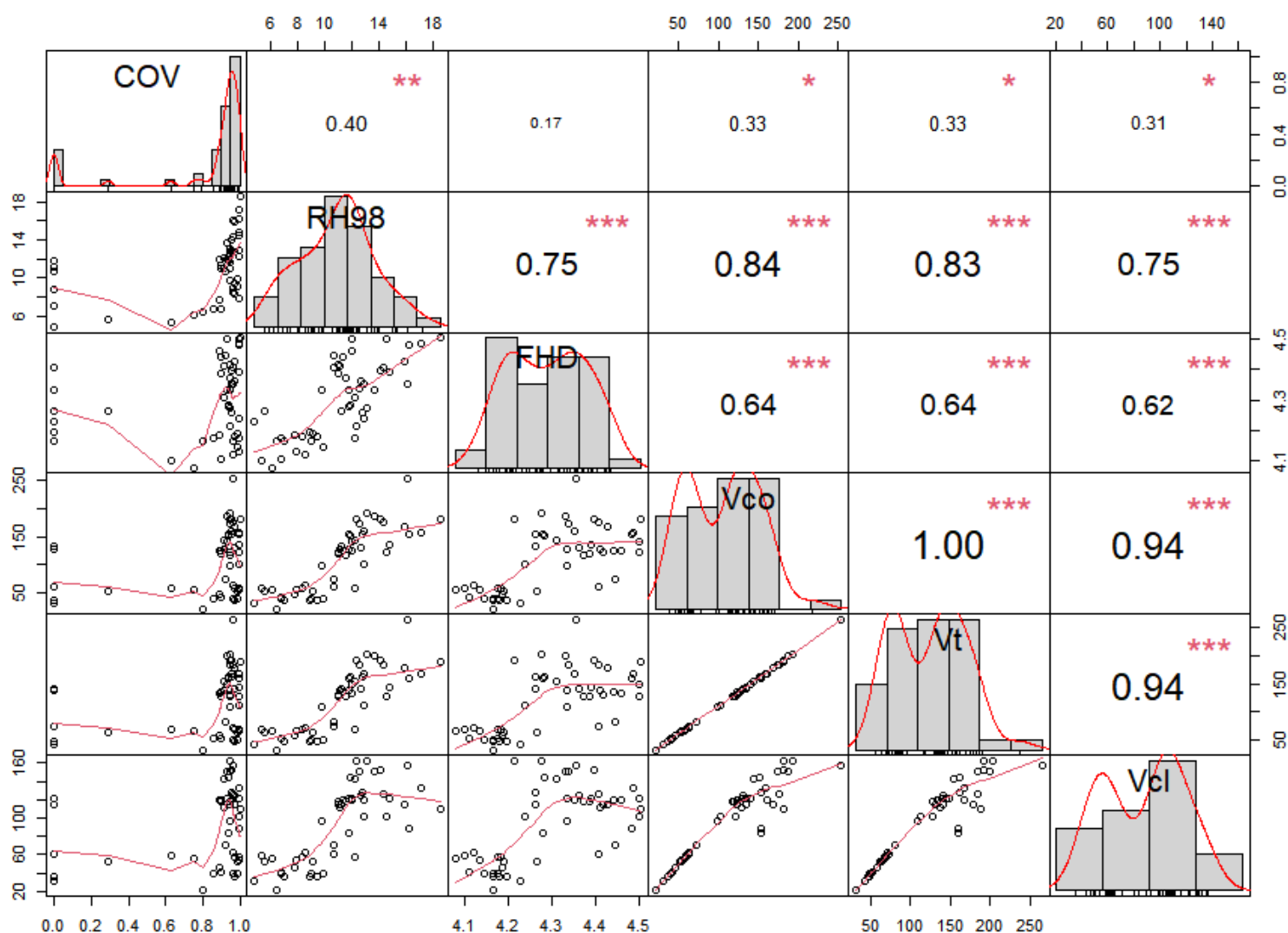
Figura 5 – Resumo esquemático da metodologia aplicada no estudo.



4 RESULTADOS

As variáveis utilizadas para prever V_t , V_{co} e V_{cl} foram avaliadas (Figura 6) de modo a estabelecer uma correlação entre as variáveis preditoras e variáveis resposta.

Figura 6 - Distribuição (diagonal principal) das variáveis preditoras (COV = cobertura de copa, RH98 = altura relativa no percentil 98th, FHD = densidade da altura de folhagem) e variáveis respostas (V_{co} = Volume comercial, V_t = Volume total, V_{cl} = Volume de celulose, em m^3/ha); correlação de *Pearson* entre as variáveis preditoras e variáveis respostas (acima da diagonal principal, com valores proporcionais ao valor) e dispersão (abaixo da diagonal principal) das variáveis preditoras. Significância: *** p-valor < 0.001; ** p-valor < 0.01; * p-valor < 0.05.



Foi observado que o V_{co} , V_t e V_{cl} tiveram maior correlação com a variável RH98, apresentando valores de 0,84, 0,83 e 0,75 respectivamente (Figura 6). Tal relação comprova a

importância da utilização desta variável para composição do modelo de predição dos volumes. O FHD apresentou correlação de 0,64 para o volume comercial e volume total e 0,62 para o volume de celulose. A variável com menor correlação dos volumes foi o COV com valores inferiores a 0,34 (Figura 6). A baixa correlação entre a variável COV e os volumes pode ser devido à forma comparativa que foi adotada para determinar a correlação entre as variáveis, que neste caso, foi linear. Além disso, a cobertura de copa pode não estar diretamente relacionada com a variação de volume na estrutura florestal. A variável COV teve importância no modelo pois o RF utiliza uma modelagem do tipo não paramétrica, portanto, não é afetado pela relação não linear entre as variáveis explicativas e resposta.

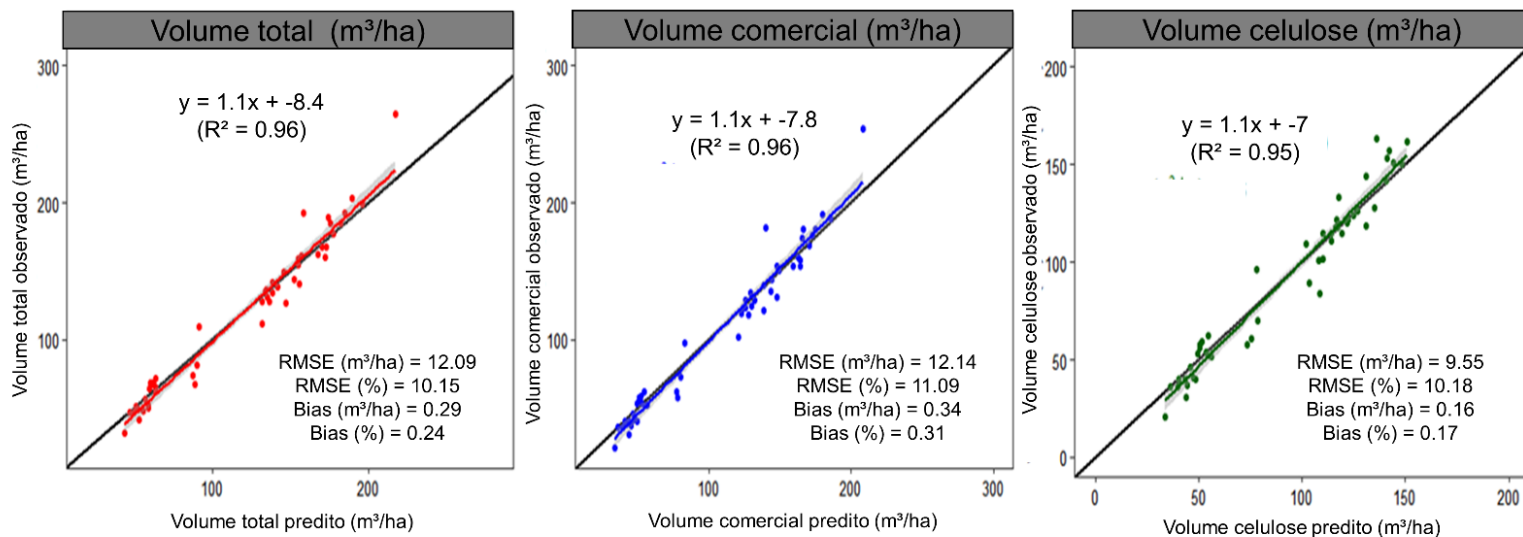
A estimativa de Vt, Vco e Vcl apresentaram RMSE e Bias inferiores a 10% (tabela 3) e conforme determinado na metodologia, a necessidade de erro para este trabalho deveria ser inferior a 20%, distanciando-se do RMSE e Bias estipulados previamente.

Tabela 3 – Resultados da validação das estimativas de volume por sortimento utilizando *Random Forest* (RF). Coeficiente de determinação (R^2) e raiz quadrada do erro médio (RMSE) (absolutos e percentuais) calculados pela relação entre o volume observado e o volume predito (ambos em m^3/ha). Vt – volume total; Vco – volume comercial; Vcl – volume de celulose.

Volume	R^2	RMSE		Bias	
		m^3/ha	%	m^3/ha	%
Vt	0,96	12,09	10,15	0,29	0,24
Vco	0,96	12,14	11,09	0,34	0,31
Vcl	0,95	9,55	10,18	0,16	0,17

A Figura 7 apresenta o desempenho dos modelos RF criados para estimar o Vt, Vco e Vcl de *Pinus taeda*, com base nas métricas de dados GEDI simulados. As três métricas do GEDI (RH98, COV e FHD) utilizadas para estimar Vt, Vco e Vcl tiveram alto poder preditivo, apresentando R^2 maior que 0,95. Ainda, foi observado um RMSE médio de 10,46%.

Figura 7 - Modelos para estimativa de volume total (Vt), volume comercial (Vco) e volume de celulose (Vcl), com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2), raiz quadrada do erro médio (RMSE) e bias, definidos em valores percentuais (%) e absolutos (m^3/ha).



5 DISCUSSÃO

A missão GEDI fornece informações estruturais florestal de forma tridimensional em diversos ecossistemas (DUBAYAH et al., 2020), além de possuir potencial inexplorado para obtenção de métricas que estimam o volume madeireiro em florestas equiâneas. Esse trabalho demonstrou o uso potencial de dados oriundos da missão GEDI para estimar o volume total (V_t), volume comercial (V_{co}) e volume de celulose (V_{cl}) em plantios de *Pinus taeda*. Além disso, este estudo foi pioneiro, pois somente um trabalho conhecido até o presente momento fez uso de dados GEDI simulados, mas para estimar o volume total em plantios comerciais de *Pinus taeda* (SILVA et al., 2019).

A acurácia do uso de dados GEDI para obtenção do V_t , V_{co} e V_{cl} utilizando a modelagem *Random Forest* foi eficaz, sendo observado valores de RMSE e Bias inferiores a 15%, sendo condizente e até inferior a estudos que predizem o volume de madeira total, em plantios de *Pinus taeda*, também com a combinação de dados de lidar orbital e aerotransportado (SILVA et al., 2019). Em estudos com lidar aerotransportado, como exemplo no sul de Wisconsin, EUA, estes dados foram utilizados para estimar o volume de celulose, onde foi encontrado o R^2 de 0,65 (HAWBAKER, 2010). Outro estudo, no sul de New South Wales, Austrália, dados lidar foram utilizados juntamente com modelo *Random Forest* para estimar o volume, sendo obtido uma RMSE de 22,3% (STONE et al., 2011). Desta forma, o uso de dados GEDI simulados podem alcançar uma precisão semelhante ou maior (HAWBAKER, 2010; DUNCANSON et al., 2020). Elevados níveis de precisão foram encontrados nas parcelas de diferentes idades com RH98, FHD e COV como variáveis preditoras, e sendo observado modelos do volume em plantios comerciais com elevada acurácia e menor bias (STONE et al., 2011). Apesar do uso de dados lidar aerotransportado ser mais usual nas práticas de manejo florestal, tais como na estimativa de volume por sortimento (V_t , V_{co} e V_{cl}), o lidar orbital apresenta ser uma alternativa por disponibilizar seus dados de maneira gratuita desde 2019.

Os modelos RF desenvolvidos nesse estudo, utilizando a *full-waveform* dos dados oriundos do GEDI simulado não foram afetados por erros de geolocalização da *full-waveform* que são inerentes aos dados GEDI. Atualmente, os erros de geolocalização são de 10 a 20 metros, porém, deverá diminuir para 8 m ao final das calibrações do GEDI, segundo estudo de Dubayah et al. (2020).

Uma desvantagem da estrutura RF consiste no fato do mesmo não extrapolar as predições além dos dados de treinamento, reduzindo a variância comparada aos dados observados. Porém, o RF consegue modelar relações não paramétricas entre variáveis

dependentes e independentes de forma mais eficiente, além de ser menos afetado por ruídos dos dados e ser uma ferramenta robusta para avaliação de elevado número de variáveis (BREIMAN, 2004; SILVA et al., 2017; MASCARO et al., 2017).

Neste trabalho, foi demonstrado que dados simulados GEDI podem fornecer variáveis que permitam a estimativa e mapeamento de atributos florestais, tais como o volume madeireiro e de celulose, com acurácia semelhante ao método tradicional. Entretanto, dados GEDI não são coletados de forma contínua. Devido a esta limitação, faz-se necessário realizar a fusão dos dados GEDI e outros produtos do sensoriamento remoto, como imagens do Sentinel 2A ou Landsat-8 OLI para prever todo o volume para a área total.

6 CONCLUSÃO

Nesse estudo, avaliamos a aplicabilidade de dados GEDI simulados para estimar o volume total (V_t), volume comercial (V_{co}) e volume de celulose (V_{cl}) em plantios comerciais de *Pinus taeda*. O algoritmo *Random Forest* foi alimentado por métricas oriundas da *full waveform* GEDI simuladas geradas através da nuvem de pontos de um sistema ALS. Até o presente momento, esse trabalho é o pioneiro na utilização de métricas provenientes de dados GEDI simulados para estimar o V_t , V_{co} e V_{cl} , e, contudo, apresentou uma precisão relativamente alta das estimativas. Espera-se que as empresas do setor florestal possam fazer uso dessa ferramenta como forma de obtenção de estimativas volumétricas com menor custo operacional para promover ferramentas alternativas para o planejamento operacional.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROKEV, G. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Vol. 22, No. 6, 711–728, 2014.

BURROUGH, P.; MCDONNELL, R. Principles of geographical Information Systems. **Oxford University Press**. 2 ed. Oxford: Oxford University Press, 1988.

CHEN, L.; REN, C.; ZHANG, B.; WANG, Z.; LIU, M.; MAN, W.; LIU, J. Improved estimation of forest stand volume by the integration of GEDI LiDAR data and multi-sensor imagery in the Changbai Mountains Mixed forests Ecoregion (CMMFE), northeast China. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Vol. 100, 2021.

D'OLIVEIRA, M. V. N.; BROADBENT, E. N.; OLIVEIRA, L. C.; ALMEIDA, D. R. A.; PAPA, D. A.; FERREIRA, M.E.; ZAMBRANO, A. M. A.; SILVA, C. A.; AVINO, F. S.; PRATA, G. A.; MELLO, R. A.; FIGUEIREDO, E. O.; JORGE, L.A. D; JUNIOR, L.; ALBUQUERQUE, R. W.; BRANCALION, P. H. S.; WILKINSON, B.; OLIVEIRA-DA-COSTA, M. Aboveground Biomass Estimation in Amazonian Tropical Forests: a Comparison of Aircraft- and GatorEye UAV-borne LiDAR Data in the Chico Mendes Extractive Reserve in Acre, Brazil. **Remote Sensing of Environment**, Vol. 12, p. 1754, 2020.

DONG, P.; CHEN, Q. LiDAR Remote Sensing and Applications. 1 ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2018.

DUNCANSON, L., NEUENSCHWANDER, A., HANCOCK, S., THOMAS, N., FATOYINBO, T., SIMARD, M., SILVA, C.A., ARMSTON, J., LUTHCKE, S.B., HOFTON, M., KELLNER, J., DUBAYAH, R. Biomass estimation from simulated GEDI, ICESat-2 and NISAR across environmental gradients in Sonoma County, California. **Remote Sensing of Environment**, Vol. 242., 2020

DUBAYAH, R.; BLAIR, J. B.; GOETZ, S.; FATOYINBO, L.; HANSEN, M.; HEALEY, S.; HOFTON, M.; HURTT, G.; KELLNER, J.; LUTHCKE, S.; ARMSTON, J.; TANG, H.; DUNCANSON, L.; HANCOCK, S.; JANTZ, P.; MARSELIS, S.; PATTERSON, P. L.; QI, W.; SILVA, C. The Global Ecosystem Dynamics Investigation: High-resolution laser ranging of the Earth's forests and topography. **Science of Remote Sensing**, Vol 1, 2020.

EVANS, J.S.; CUSHMAN, S.A. Gradient modeling of conifer species using Random Forests. **Landscape Ecology**. Vol. 5, p. 673–683, 2009.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO). **Avaliação Global de Recursos Florestais 2020 - Principais conclusões**. Roma: FAO, 2006.

GIONGO, M.; KOEHLER, H. S.; MACHADO, S. do A.; KIRCHNER, F.F.; MACHETTI, M. LiDAR: princípios e aplicações florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v.30, p.231-244, 2010.

HAWBAKER, T.J.; GOBAKKE, T.; LESAK, A.; TROMBORG, E.; CONTRUCCI, K.; RADELOFF, V. Light detection and ranging-based measures of mixed hardwood forest structure. **Forest Science**, v. 56, p.313–326, 2010

HUDAK, A. T.; CROOKSTON, N. L.; EVANS, J. S.; FALKOWSKI, M. J.; SMITH, A. M. S.; GESSLER, P. E. Regression modeling and mapping of coniferous forest basal area and tree density from discrete-return LiDAR and multispectral satellite data. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 32, p. 126–138, 2006.

HUDAK, A. T.; CROOKSTON, N. L.; EVANS, J. S.; HALL, D. E.; FALKOWSKI, M. J. Nearest neighbor imputation of species-level, plot-scale forest structure attributes from lidar data. **Remote Sensing of Environment**, Vol. 112, p. 2232–2245, 2008.

HUDAK, A. T.; STRAND, E. K.; VIERLING, L. A.; BYRNE, J. C.; EITEL, J. U. H.; MARTINUZZI, S.; FALKOWSKI, M. J. Quantifying aboveground forest carbon pools and fluxes from repeat LiDAR surveys. **Remote Sensing of Environment**, v. 82, p. 397–416, 2012.

HUO, L.; SILVA, C. A.; KLAUBERG, C.; MOHAN, M.; ZHAO, L.; TANG, P.; HUDAK, A. T. Supervised spatial classification of multispectral lidar data in urban areas. **PLoS One**, Vol. 13, 2018.

Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ). **Relatório anual de 2017**. Disponível em: http://www.iba.org/images/shared/iba_2017.pdf. Acesso em: 20/04/2021.

Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ). **Relatório anual de 2020**. Disponível em: http://www.iba.org/images/shared/iba_2020.pdf. Acesso em: 10/04/2021.

JENSEN, J. R. *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*, 2 ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, 2006.

KOHLER, S. V.; WOLFF, N.I.; FIGUEIREDO FILHO, A.; ARCE, J. E. Dynamic of assortment of *Pinus taeda* L. plantation in different site classes in Southern Brazil. **Scientia Forestalis (IPEF)**, Vol. 42, p. 403–410, 2014.

LEITE, R. V.; SILVA, C. A.; MOHAN, M.; CARDIL, A.; ALMEIDA, D. R. A. D.; CARVALHO, S. D. P. C.; JAAFAR, W. S. W. M.; HERNÁNDEZ, J. G.; WEISKITTEL, A.; HUDAK, A. T.; BROADBENT, E. N.; PRATA, G.; VALBUENA, R.; LEITE, H. G.; TAQUETTI, M. F.; SOARES, A. A. G.; SCOLFORO, H. F.; AMARAL, C. H.; DALLA CORTE, A. P.; KLAUBERG, C. Individual Tree Attribute Estimation and Uniformity Assessment in Fast-Growing *Eucalyptus* spp. Forest Plantations Using Lidar and Linear Mixed-Effects Models. **Remote Sensing of Environment**, Vol. 12, p. 3599, 2020.

LOPATIN, J.; DOLOS, K.; HERNÁNDEZ, H. J.; GALLEGUILLOS, M.; FASSNACHT, F. E. Comparing Generalized Linear Models and random forest to model vascular plant species richness using LiDAR data in a natural forest in central Chile. **Remote Sensing of Environment**, Vol. 173, p. 200–210, 2016.

MCGAUCHEY, R. J. **FUSION/LDV: Software for LiDAR Data Analysis and Visualization**. Forest Service Pacific Northwest Research Station USDA: Seattle, WA, USA, 2016. Disponível em: <http://forsys.cfr.washington.edu/fusion/FUSIONmanual.pdf>. Acesso em: 15/03/2021.4

MORA, A. L.; GARCIA, C. H. A cultura do eucalipto no Brasil (*Eucalyptus* cultivation in Brazil). São Paulo: SBS – Sociedade Brasileira de Silvicultura, 112 p., 2000.

NAESSET, E. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. **Remote Sensing of Environment**, Vol.80, n.1, p. 88-99, 2002.

NILSSON, M. Estimation of tree heights and stand volume using an airborne LiDAR system. **Remote Sensing of Environment**, Vol. 56, n.1, p. 1-7, 1996.

PEARSE, G. D.; DASH, J. P.; PERSSON, H. J.; WATT, M. S. Comparison of high-density LiDAR and satellite photogrammetry for forest inventory. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**. Vol. 142, p. 257-267, 2018.

POTAPOV, P., LI, X., HERNANDEZ-SERNA, A., TYUKAVINA, A., HANSEN, M. C., KOMMAREDDY, A., PICKENS, A.; TURUBANOVA, S.; TANG, H.; SILVA, C. E.; ARMSTON, J.; DUBAYAH, R.; BLAIR, J.B.; HOFTON, M. Mapping global forest canopy height through integration of GEDI and Landsat data. **Remote Sensing of Environment**, Vol. 253, 2020

QU, Y.; SHAKER, A.; KORHONEN, LAURI.; SILVA, C. A.; JIA, KUN.; TIAN, LUO.; SONG, J. Direct Estimation of Forest Leaf Area Index based on Spectrally Corrected Airborne LiDAR Pulse Penetration Ratio. **Remote Sensing of Environment**, Vol. 12, p. 217, 2020.

SILVA, C. A.; KLAUBERG, C.; HUDAK, A.; VIERLING, L.; LIESENBERG, V.; CARVALHO, S.; RODRIGUEZ, L. C. E. A principal component approach for predicting stem volume in *Eucalyptus* plantations in Brazil using airborne LiDAR data. **Forestry**, Vol. 91, p. 1-20, 2016.

SILVA, C. A.; KLAUBERG, C.; CARVALHO, S. DE P. C. E.; CORTE, A. P. D. Modeling and mapping basal area of *Pinus taeda* plantation using airborne lidar data. **Anais Da Academia Brasileira De Ciências**, Vol. 45, p. 1, 2017.

SILVA, C. A.; DUNCANSON, L.; HANCOCK, S.; NEUENSCHWANDER, A.; THOMAS, N.; HOFTON, M.; & DUBAYAH, R. Fusing simulated GEDI, ICESat-2 and NISAR data for regional aboveground biomass mapping. **Remote Sensing of Environment**, Vol. 253, 2021.

SILVA, C. A.; HUDAK, A.; VIERLING, L. A.; LOUDERMILK, L.; O'BRIEN, J. J.; HIERS, J.; JACK, S. B.; GONZALEZ-BENECKE, C. A.; LEE, H.; FALKOWSKI, M. J.; KHOSRAVIPOUR, A. Imputation of Individual Longleaf Pine (Mill.) Tree Attributes from Field and LiDAR Data. **Canadian Journal of Remote Sensing**, Vol. 42, p. 554-573, 2016.

SILVA, C. A.; KLAUBERG, C.; CARVALHO, S. P. C.; HUDAK, A.; RODRIGUEZ, L. C. E. Mapping aboveground carbon stocks using LiDAR data in *Eucalyptus* spp. plantations in the state of São Paulo, Brazil. **Scientia Forestalis (IPEF)**, Vol. 42, p. 591-604, 2014.

SILVA, C.A. **Carbono na parte aérea de plantios de *Eucalyptus* spp. em nível de árvore por amostragem destrutiva e para talhões inteiros após o ajuste de métricas**. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Universidade de São Paulo - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, p. 153, 2013.

SILVA, C. A.; DUNCANSON, L.; HANCOCK, S.; KLAUBERG, C. et al. **Estimating forest attributes in industrial *Pinus taeda* l. forest plantations in Brazil using simulated NASA's GEDI spaceborne lidar data.** In: Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2019, Santos. Anais eletrônicos... São José dos Campos, INPE, 2019. Disponível em: <<https://proceedings.science/sbsr-2019/papers/estimating-forest-attributes-in-industrial-pinus-taeda-l--forest-plantations-in-brazil-using-simulated-nasa---s-gedi-spa>>. Acesso em: 10 Maio. 2021.

SILVA, C. A.; KLAUBERG, C.; HUDAK, A. T.; VIERLING, L. A.; LIESENBERG, V.; CARVALHO, S. P.; RODRIGUEZ, L. C. A principal component approach for predicting the stem volume in *Eucalyptus* plantations in Brazil using airborne Lidar data. **Forestry** Vol. 89, p. 422–433, 2016.

SILVA, C. A.; KLAUBERG, C.; MENDONÇA, B. A. F.; CARVALHO, S. P. C. Efeito da densidade de pontos LiDAR na predição da altura em plantações de *Pinus taeda* L. **Scientia Forestalis**, Vol. 45, p. 481-492, 2017.

SILVA, V. S.; SILVA, C. A.; MOHAN, M; CARDIL, A.; REX, F. E.; LOUREIRO, G. H.; ALMEIDA, D. R. A.; BROADBENT, E. N.; GORGENS, E. B.; DALLA CORTE, A. P.; SILVA, E.A.; VALBUENA, R.; KLAUBERG, C. Combined Impact of Sample Size and Modeling Approaches for Predicting Stem Volume in *Eucalyptus* spp. Forest Plantations Using Field and LiDAR Data. **Remote Sensing of Environment**, Vol. 12, p. 1438, 2020.

STONE, C.; PENMAN, T.; TURNER, R. Determining an optimal model for processing lidar data at the plot level: results for a *Pinus radiata* plantation in New South Wales, Australia. **New Zeland Journal of Forestry Science**, Vol. 41, p. 191-205, 2011.

TANG, H.; DUBAYAH, R.; SWATANTRAN, A.; HOFTON, M.; SHELDON, S.; CLARK, D. B. Retrieval of vertical LAI profiles over tropical rain forests using waveform lidar at La Selva, Costa Rica. **Remote Sensing of Environment**, Vol. 124, p. 242-250, 2012.

ANEXO A**Termo de autorização para publicação no Repositório Institucional da UFSJ**

Eu Anne Laura da Silva, RG nº 19.166.199; Org. Exp. PCE - MG, CPF 128.351.436-29, e-mail: annelsilva11@gmail.com, telefone (31) 971026489, na qualidade de titular dos direitos de autor que recaem sobre minha produção:

(x) trabalho de conclusão de curso () dissertação de mestrado () tese de doutorado

() _____ (outro)

Título: Estimativa de volume por sortimento em plantações de *Pinus taeda* L. usando dados GEDI, defendida em: 14/07/2021, no programa de (x) Graduação () Pós-Graduação em Engenharia Florestal, com fundamento nas disposições sobre direitos autorais (Lei nº 9.610 de 19 de fevereiro de 1998), autorizo a Universidade Federal de São João del-Rei a disponibilizar gratuitamente a obra citada, sem ressarcimento de direitos autorais, para fins de leitura e impressão, a título de divulgação da produção científica gerada pela universidade, a partir desta data. Autorizo a liberação:

() Total

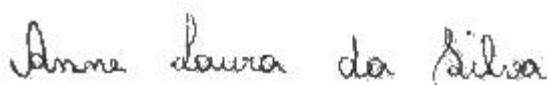
(x) Parcial (serão disponibilizados apenas resumo, palavras-chave, e os dados: autor, título, membros da banca examinadora, data de defesa, entre outros).

Motivo: Dados de posse da empresa florestal.

Obs.:

- No caso de liberação parcial, a dissertação/tese impressa não poderá ser consultada no acervo.
- Estou ciente que, em caso de liberação parcial, o documento será mantido nesta opção durante 1 (um) ano a partir da data de autorização da publicação. Para ampliação deste prazo, devo manifestar-me junto a Dibib/UFSJ. Para liberação antes do prazo estipulado, formalizarei a autorização. Se não houver manifestação, o texto completo da dissertação/tese será liberado em sua totalidade e a versão impressa será disponibilizada para consulta.
- O conteúdo disponibilizado é de minha inteira responsabilidade.

Sete Lagoas, MG, 14 de julho de 2021.



Assinatura do Autor