

IDENTIFICAÇÃO E DETERMINAÇÃO DA ALTURA DAS ÁRVORES DE *EUCALYPTUS SP* A PARTIR DE DADOS *LIDAR* E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS POR MEIO DE ORTOFOTOS E MEDIDAS DE CAMPO

Gustavo Bretas Lage

Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências,
Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais, Belo Horizonte, MG, Brasil
gbretaslage@gmail.com

Kelen Karla Reis Oliveira

Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências,
Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais, Belo Horizonte, MG, Brasil
kelen.oliveira@outlook.com

Túlio Bretas Lage

Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências,
Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais, Belo Horizonte, MG, Brasil
tuliobl@gmail.com

Marcelo Antonio Nero

Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências,
Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais, Belo Horizonte, MG, Brasil
marcelo-nero@ufmg.br

Ricardo Alexandrino Garcia

Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências,
Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais, Belo Horizonte, MG, Brasil
alexandrinogarcia@gmail.com

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo estimar a posição geográfica e a altura individual de árvores em plantios de eucalipto de modo automatizado por meio de processamento computacional. Os dados utilizados nesta pesquisa foram obtidos com o sistema *Airborne Laser Scanner (ALS)* e permitiram gerar um modelo digital de vegetação normalizado (MDVn) que representa a biomassa da superfície. Nesse modelo, aplicou-se uma metodologia de geoprocessamento que permitiu analisar o modelo da biomassa, determinando-se o topo de cada árvore e sua altura. Para validar os resultados, utilizaram-se ortofotos de melhor resolução espacial disponível, obtendo-se 93% de precisão média nos cálculos. Na comparação dos dados de alturas médias estimadas das 100 maiores árvores por meio da tecnologia *LIDAR* e das mesmas alturas obtidas por meio do inventário florestal, o coeficiente de determinação R^2 foi de 0,8826. Os resultados indicaram que a metodologia utilizada apresenta precisão adequada para a identificação de indivíduos e para a estimativa de altura das árvores, oferecendo viabilidade de replicação da metodologia para outros tipos de vegetação similares.

Palavras-chave: Individualização de árvores. Modelos digitais. Varredura a laser aerotransportado.

IDENTIFICATION AND DETERMINATION OF THE HEIGHT OF *EUCALYPTUS SP* TREES FROM *LIDAR* DATA AND EVALUATION OF RESULTS THROUGH ORTHOPHOTOS AND FIELD MEASURES

ABSTRACT

The aim of the present study was to estimate the geographical position and individual height of trees on eucalyptus plantations. The data were obtained using airborne laser scanning (ALS), which enabled generating a standardized digital vegetation model (SDVM) of surface biomass. Geoprocessing was applied to this model, which enabled analyzing the biomass model and determining the peak of each tree and its height. Orthophotos with high spatial

resolution were used to validate the results, obtaining an average precision of 93% in the calculations. In the comparison of the average height data of the 100 tallest trees estimated using *LIDAR* technology and the same height estimated by the forest inventory, the coefficient of determination (R^2) was 0.8826. The results indicate that the method has adequate precision for the identification of individuals and the estimation of tree height. This method could be replicated with other types of similar vegetation.

Keywords: Individualization of trees. Digital models. Airborne Laser Scanning.

INTRODUÇÃO

O setor florestal brasileiro tem se tornado, nos últimos anos, um dos mais relevantes no cenário global. Em 2016 o produto interno bruto setorial totalizou 71,1 bilhões de reais, contribuindo para a geração de 3,7 milhões de empregos diretos e indiretos. Nesse mesmo ano as florestas plantadas atingiram uma área de 7,84 milhões de hectares, sendo que o gênero *Eucalyptus* representa aproximadamente 72,7% do total. Minas Gerais é o principal estado produtor com 24% da área plantada (IBÁ, 2017).

A mensuração de florestas, principalmente daquelas associadas a fins comerciais, é o principal mecanismo para a obtenção de informações dendrométricas que caracterizam os indivíduos e os povoamentos florestais e, constituindo-se em um importante elemento no manejo florestal. Isso se explica pelo fato dessa mensuração fornecer informações precisas sobre as florestas, possibilitando a tomada de decisões e o planejamento adequado das atividades envolvidas. Em termos de cálculo volumétrico vale destacar o trabalho realizado por Schröder, Pereira e Hofiço(2013), no qual os autores comparam os métodos de estimativas de determinação do volume total de eucalipto. A identificação e individualização das árvores podem ser realizadas por meio da utilização de algoritmos de reconhecimento de padrões aliado à inteligência artificial, aplicando-se filtros de processamento de imagens nos dados da varredura a laser, sendo uma importante etapa dos estudos que objetivam extrações de informações dendrométricas (SUÁREZ et al.; 2005).

As técnicas clássicas de inventário florestal demandam tempo e muitas vezes são onerosas em termos de recursos, sendo ainda, em alguns casos, inviabilizadas pela dificuldade de acesso às áreas. Nesse sentido, novos métodos de avaliação florestal têm sido propostos utilizando técnicas de sensoriamento remoto. Dentre esses métodos, destaca-se o sistema *Airborne Laser Scanner (ALS)*, com base na tecnologia *Light Detection and Ranging -LIDAR* (WANG; WANG; LIU, 2019).

O sistema de varredura a laser aerotransportado, baseado na tecnologia *LIDAR* é uma técnica de sensoriamento remoto ativo que tem demonstrado bons resultados na mensuração da estrutura vertical e horizontal em ambientes florestais, auxiliando o entendimento dos ecossistemas florestais, produzindo informações com alta confiabilidade sobre variáveis chave no estudo de parâmetros biofísicos da vegetação (INOMATA et al.; 2018).

Alguns trabalhos evidenciam que é possível extrair variáveis dendrométricas a partir de dados do *LIDAR*, permitindo assim um aumento na acurácia das estimativas de volume de biomassa (ZANDONÁ; LINGNAU; NAKAJIMA,2008).

A integração entre os Sistemas de Informações Geográficas e os dados *LIDAR* torna possível, além da estimativa de dados dendrométricos, a análise da dinâmica espacial de distribuição desses povoamentos florestais no espaço. Esse conjunto de informações pode ser utilizado em modelos de otimização de prognose da produção, avaliações de crescimento da vegetação e estudos de melhoramento de espécies (SILVEIRA, 2010).

Algumas pesquisas voltadas ao uso da tecnologia *LIDAR* têm sido realizadas, valendo destacar, por exemplo, os trabalhos de Silva et al.:(2016), Silva et al. (2017), Coelho Filho, Bittencourt e Brito(2019).

No âmbito brasileiro de florestas plantadas, cabe destacar os trabalhos como o de Zandoná, Lingnau e Nakajima (2008), que propôs uma metodologia para a estimativa de altura individual, área e diâmetro de copa em povoamentos de *Pinus taeda*. Os resultados desse trabalho demonstraram que a identificação de indivíduos foi satisfatória, especialmente daqueles que se encontravam no dossel superior (dominantes e codominantes), onde o acerto médio foi de 82,8 %.

Ainda nesse contexto, deve-se destacar o trabalho de Zonete, Rodriguez e Packalén (2010), no qual foi analisado o emprego dessa tecnologia para inventários florestais em plantios clonais de *Eucalyptus sp* na Região Sul da Bahia. Já Oliveira et al. (2012) buscaram aperfeiçoar técnicas de inventário florestal utilizando dados *LIDAR* através da diminuição da intensidade amostral e do erro de estimativa para esses plantios.

Em termos de estimativa de estoque de biomassa em áreas florestais, bem como da quantificação de biomassa (volume) e da estimativa volumétrica, vale destacar trabalhos como os de Ferraz et al. (2014) e Gama et al. (2015). Adicionalmente, considerando o tema de avaliação de volumes de madeira de eucalipto é possível destacar o trabalho de Lundgren, Silva e Ferreira (2016).

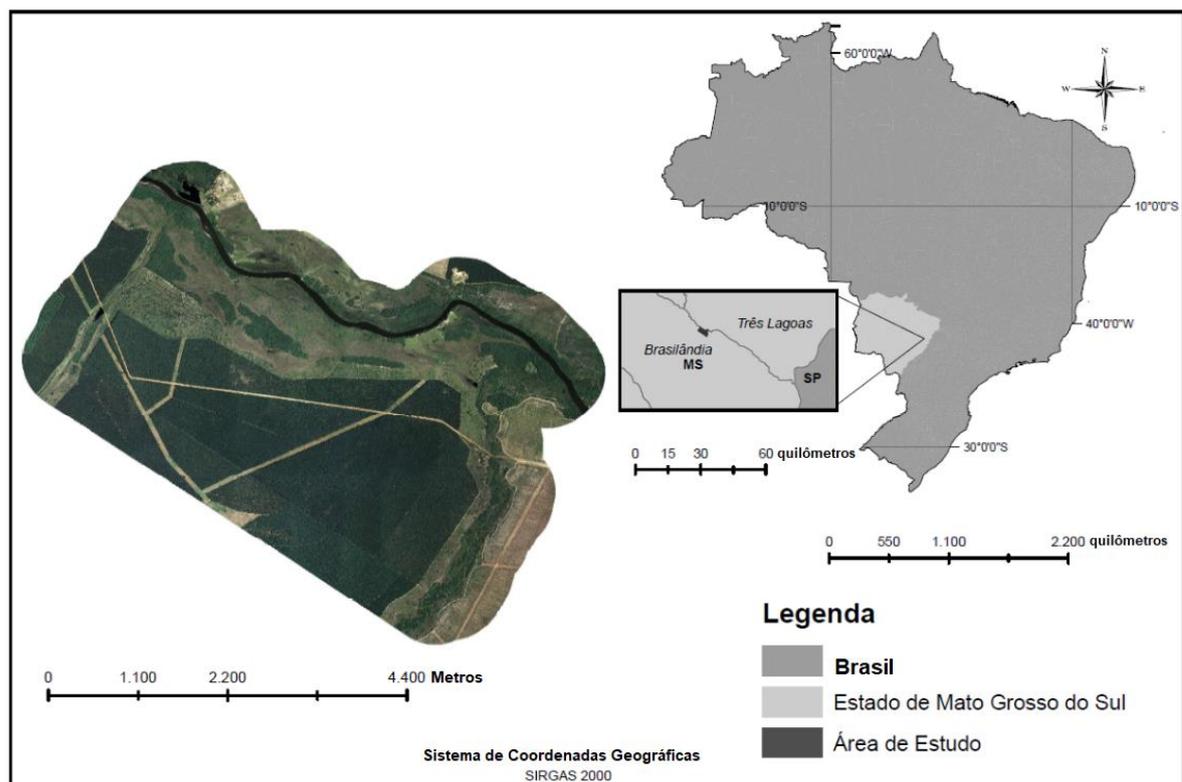
Em termos de trabalhos realizados e que empregaram dados do sistema laser aerotransportado para a detecção de espécimes vegetais vale destacar Ossola e Hopton (2018), Muller et al. (2014), Oshio et al. (2013), Kaartinen et al. (2012). Nesse sentido, a presente pesquisa propõe uma metodologia para individualização de árvores em plantios comerciais de eucalipto, utilizando modelos digitais produzidos a partir da tecnologia *LIDAR*. Adicionalmente, foi avaliada a qualidade e a validação dos resultados obtidos, com o emprego do índice Kappa (aplicado em pesquisas recentes, tais como em Pereira et al (2018), Rosa, Ferreira e Brito (2019), Abreu Júnior et al.(2020), Ferrelli et al.(2020).

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

A área de estudo, apresentada na Figura 1, possui 1.185 hectares. Desse total, 633 ha são utilizados para o manejo de Eucalipto e encontram-se fragmentados em 13 talhões que representam a unidade de trabalho ou produção florestal, com localização e dimensões bem definidas. Situa-se na Região Leste do Estado do Mato Grosso do Sul na Bacia do Rio Paraná (Figura 1). Deve-se ressaltar que o Estado do Mato Grosso do Sul vem destacando-se no setor de florestas plantadas. Ao longo dos últimos oito anos, a área destinada ao plantio comercial de eucalipto no Estado cresceu 566%, saindo de 120 mil para os atuais 820 mil hectares (REFLORE, 2015).

Figura 1 - Mapa da localização da área de estudo.



Obtenção dos dados LIDAR

O *LIDAR* é uma técnica de sensoriamento remoto ativo e um método direto de captura de dados, com sua fonte própria de energia. Nesse caso, uma fonte de radiação eletromagnética (REM), o laser, a qual emite ondas curtas no espectro do infravermelho (1-10 μm), sendo sensível às perturbações atmosféricas (ANDERSEN; REUTEBUCH; MCGAUGHEY, 2006).

O princípio de funcionamento consiste na emissão de pulsos laser de uma plataforma sob uma determinada taxa de frequência de repetição. O tempo de retorno dos pulsos laser entre a plataforma e os alvos é calculado pelo sensor, permitindo estimar a distância entre eles.

Nos sistemas laser aerotransportados *ALS*, cada ponto de laser projetado na superfície tem suas coordenadas planimétricas e medidas de elevação da superfície registradas. As coordenadas planimétricas de latitude e longitude dos pontos de laser são obtidas por meio da sincronização de um sistema de posição e orientação integrados, composto por um *Differential Global Positioning System (DGPS)* e uma *Inertial Measurement Unit (IMU)*, bem como os dados do laser (SILVA et al.; 2017).

Os dados laser utilizados nesta pesquisa foram cedidos pela empresa Fibria, a qual possui a propriedade da área de estudo e a utiliza para o manejo de eucaliptos destinados à produção de celulose. O levantamento a laser aerotransportado foi realizado pela empresa Fototerra Atividades de Aerolevantamentos Ltda. O voo para aquisição da nuvem de pontos foi realizado com base nos parâmetros apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Especificações do voo.

PARÂMETROS	VALORES
Data do levantamento	30/11/2011
Densidade de pontos (pontos/m ²)	5
Altura de voo (m)	2.000
Largura da Faixa (m)	727
Frequência de operação (khz)	300
Ângulo de divergência (mrad)	≤ 0,5
Ângulo de abertura (graus)	60
Sistema	LIDAR Harrier

Fonte - próprios autores (2021).

Processamento dos dados LIDAR

Utilizando-se o sistema *LIDAR*, criou-se um conjunto de dados, a chamada “nuvem de pontos”, com informação das coordenadas X, Y e Z, que posteriormente foi empregada na modelagem tridimensional da superfície do terreno.

Por meio de procedimentos de processamento e filtragem dos dados, foi possível gerar produtos como o Modelo Digital de Superfície (MDS) e o Modelo Digital de Terreno (MDT). O MDS representa a cobertura do solo. Nesse modelo os pontos gerados representam as edificações, árvores e estruturas diversas que se encontram no solo. Já o MDT representa a superfície do solo sem qualquer cobertura. Para que fosse possível gerar esse modelo em uma área coberta por vegetação, foi necessário identificar na nuvem de pontos os pulsos que atingiram o terreno, identificando no conjunto de dados os pontos mais baixos, seguindo metodologia similar à indicada por Schimalesky e Centeno (2007). A alta densidade de pontos por unidade de área permitiu uma alta resolução espacial desses modelos, o tamanho de célula, ou “pixel”, equivalente a 50 cm.

Para determinação da localização geográfica de cada indivíduo e sua altura seguiram-se os passos estabelecidos na Figura 2. Para tal utilizou-se o *software* ArcGis 10.3.1 (ESRI, 2016), licenciado para a UFMG (Universidade Federal de Minas Gerais),

Inicialmente, um modelo digital da vegetação normalizado (MDVn) foi gerado. Esse modelo, que pode ser obtido através de um processo matemático matricial simples (subtração do MDS do MDT) consiste na representação tridimensional da cobertura do solo em análise. Nesse caso, o MDVn representa basicamente a floresta de eucaliptos.

Em um segundo passo, um novo modelo digital foi calculado objetivando a inversão dos valores do MDVn. Esse novo modelo, que nomearemos neste trabalho de modelo digital da vegetação normalizado negativo (MDVn-1), foi elaborado com o objetivo de permitir que a determinação da localização geográfica das árvores fosse feita por meio de algoritmos comumente utilizados para análises hidrográficas.

No processo de inversão do MDVn, foi criado um modelo cujas características se assemelham a de uma área com inúmeras pequenas depressões (as árvores invertidas). A individualização das árvores foi então realizada por meio de um algoritmo de fluxo de ponto de fluxo que identifica o pixel mais profundo dentro de um sulco. Ou seja, áreas de menor cota dentro dessas depressões, nas quais existe uma tendência ou um direcionamento do fluxo de fluidos, como a água.

O algoritmo utilizado se baseia na vizinhança imediata em uma janela de 3x3 pixels para determinar qual dos oito vizinhos de uma célula (*pixel*) flui para ela. O fluxo é determinado por qualquer célula dentro da vizinhança que tem um valor menor do que a célula de processamento. Metodologia essa aplicada, por exemplo, por Campos e Leite (2013), Oshio et al. (2013).

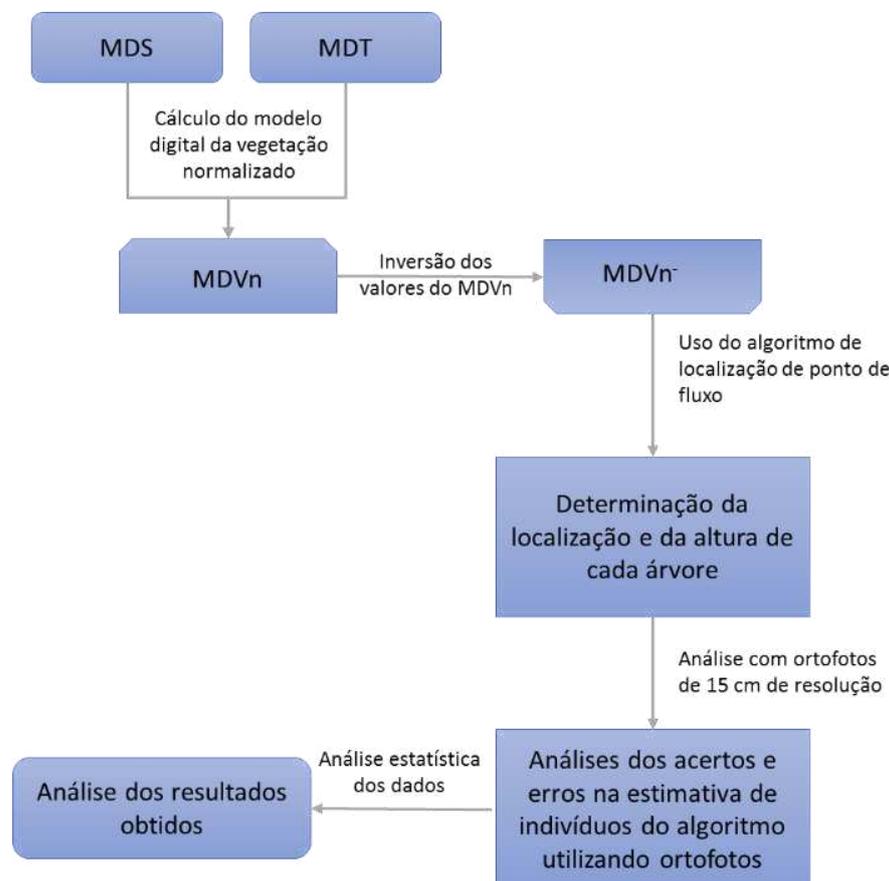
Ao se encontrar o pixel mais profundo das depressões, encontra-se ao ponto que equivale ao topo das árvores presentes no modelo digital. Com isso, é possível determinar a localização e a altura das árvores individualizadas. Ao final dessa etapa, um arquivo com a localização e a altura de cada árvore individualizada foi gerado.

Para avaliar os resultados obtidos na metodologia proposta, é necessário conhecer o real número de árvores presentes em cada amostra, por isso uma contagem visual dessas foi realizada com o auxílio de ortofotos com resolução espacial de 15 cm e obtidas com veículo aéreo não tripulado (VANT).

Metodologia aplicada e sua eficiência

A Figura 2 apresenta o esquema geral da metodologia aplicada, considerando-se os dados de entrada (MDS, MDT), o procedimento no qual se processaram as ortofotos, a contagem das árvores individualizadas pela identificação dos topos, a definição das alturas dessas, avaliação da qualidade e da eficiência da metodologia aplicada.

Figura 2 - Fluxograma geral com as etapas da metodologia para individualização das árvores e análise dos resultados.



Após a identificação dos acertos e erros cometidos pelo algoritmo na identificação das árvores, utilizou-se a matriz de erro, também conhecida como matriz de confusão, de modo a se avaliar a acurácia da predição dos valores de altura.

A matriz de confusão constitui-se, segundo Congalton e Green (2019), em uma das técnicas mais utilizadas na realização da avaliação de acurácia de métodos preditivos de dados oriundos de sensoriamento remoto. A matriz de confusão pode ser usada como ponto de partida para uma série de técnicas estatísticas descritivas e analíticas, entre as quais destaca-se o Índice Kappa (K), cujos valores foram calculados com base na relação entre a proporção de acertos observados (Ao) e a proporção de acertos esperados (Ae) com base nos dados estimados pelo modelo e os provenientes do inventário florestal de campo (medidas de amostra de ao menos 30 alturas em campo), conforme a equação a seguir.

$$K = 1 - \frac{1 - A_o}{1 - A_e}$$

A aplicação do coeficiente de concordância ou índice Kappa para a validação dos resultados e as interpretações de acordo com Fleiss, Cohen e Everitt (1969), Congalton e Green (2019) (baseado em Landis e Koch, 1977) e Monserud e Leemans, (1992), é demonstrada por Foody (2020) (Quadro 1), sendo considerado neste trabalho.

Quadro 1 - Classificação para interpretação do índice Kappa.

Kappa	AUTORES		
	Congalton e Green (2019)	Fleiss, Cohen e Everitt (1969)	Monserud e Leemans (1992)
1.0	Quase perfeito	Excelente	Perfeito Excelente
0.8			Muito Bom
0.6	Substancial	Suficiente para bom	Bom
0.4	Moderado		Suficiente
0.2	Suficiente	Pobre	Pobre
0.0	Leve		Muito Pobre
	Pobre		Nenhuma

Fonte - Adaptado (FOODY, 2020).

Em função da grande dimensão da área estudada, as análises foram realizadas inicialmente em 6 amostras de imagens com diferentes padrões de textura e distribuídas aleatoriamente entre os 13 talhões da área de estudo. As imagens das amostras são apresentadas na Figura 3.

Como mencionado anteriormente, as árvores identificadas automaticamente através do emprego do algoritmo foram comparadas àquelas identificadas por meio das ortofotos, sendo realizada uma análise visual por sobreposição. Através do cruzamento desses dados, foi possível identificar os acertos e os erros

presentes na classificação. Cabe ressaltar que os erros foram classificados como de exclusão (pixels que representam um indivíduo, mas que não foram identificados) e de inclusão (pixels identificados com árvores, mas que não representam um indivíduo). A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos.

Figura 3 - Apresentação das amostras da área estudada.

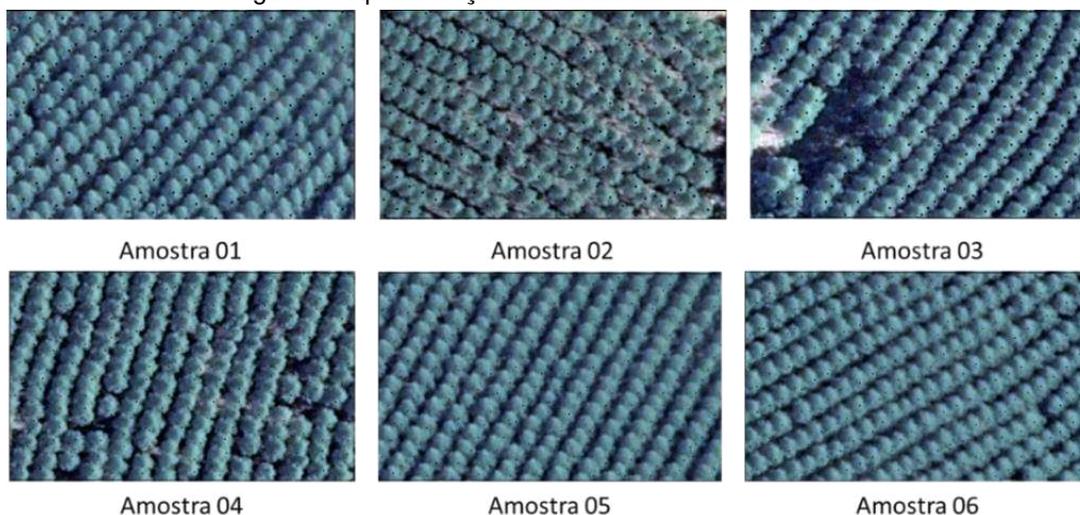


Tabela 2 - Detalhamento dos acertos e erros do algoritmo em relação ao número total de árvores identificadas nas ortofotos.

Amostra	Acertos	Erros		Total de árvores na amostra	Percentual de acertos
		De exclusão	De inclusão		
1	143	7	13	150	95%
2	142	19	7	161	88%
3	169	17	24	186	91%
4	162	9	3	171	95%
5	182	8	11	190	96%
6	167	9	7	176	95%
Total	965	69	65	1034	93%

Vale a pena também comentar a respeito do índice R^2 , obtido por meio da análise do ajuste de dados a uma função de reta, pela análise da dispersão dos dados em relação a essa mesma reta. Quanto mais próximo de 100% melhor o indicativo do resultado. Exemplos podem ser vistos em análises, tais como em Oliveira (2013) e Oliveira et al. (2017).

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Ao realizar uma primeira análise, notou-se o alto percentual de acertos apresentado pelo algoritmo de individualização, que, de forma geral, acertou a localização de 93% das árvores. Observa-se ainda que para as amostras 2 e 3 (vide Tabela 2) o algoritmo apresentou desempenho inferior. Nessas amostras notou-se que o plantio não apresentou distribuição espacial tão homogênea como nas demais, além de apresentar uma quantidade maior de falhas (espaços vazios) entre as árvores. Adicionalmente, constatou-se certa diferença no formato das copas, o que pode ter atrapalhado o desempenho do algoritmo.

Nas análises realizadas por meio da matriz de confusão, foi possível determinar parâmetros importantes, com base em autores consagrados, tais como Fleiss, Cohen e Everitt (1969), Landis e Koch (1977), Monserud e Leemans, (1992), Congalton e Green (2019), bem como mais recentemente por Foody (2020). São estes: a Acurácia, que representa a proporção de predições corretas; a Eficiência, que representa uma média aritmética entre a proporção de verdadeiros positivos e verdadeiros negativos; e os valores preditivos positivo e negativo que correspondem respectivamente à proporção de verdadeiros positivos em relação a todas as predições positivas e à proporção de verdadeiros negativos em relação a todas as predições negativas. Esses parâmetros são mostrados pela Tabela 3.

Tabela 3 - Principais parâmetros obtidos através da matriz de confusão.

Amostra	Acurácia	Eficiência	Valor Preditivo Positivo	Valor Preditivo Negativo
1	99,7%	97,6%	91,7%	99,9%
2	99,6%	94,0%	95,3%	99,7%
3	99,4%	95,3%	87,6%	99,7%
4	99,8%	97,3%	98,2%	99,9%
5	99,7%	97,8%	94,3%	99,9%
6	99,8%	97,4%	96,0%	99,9%

Para todos os parâmetros obtidos através da matriz de confusão, como observado na tabela 3, os percentuais foram superiores a 90%, o que indica que a identificação realizada pelo algoritmo foi satisfatória.

Outro parâmetro obtido através da matriz de confusão foi o índice Kappa, que pode ser definido como uma medida de associação usada para descrever e testar o grau de concordância (confiabilidade e precisão) de uma classificação. Os valores desse índice são apresentados na Tabela 4, sendo interpretados pelos diversos autores abordados por Foody (2020) no item sobre a metodologia aplicada. Por essa tabela nota-se que os resultados obtidos estão classificados do ponto de vista de qualidade temática em “quase perfeito” com base no conceito de Congalton e Green (2019) e em “excelente” considerando-se tanto Fleiss, Cohen e Everitt (1969) como Monserud e Leemans (1992). Ainda, com base em Sousa et al. (2018), nota-se a ocorrência em todas as amostras de um ótimo grau de aceitação, estando todos os valores do índice Kappa muito próximos de 1 (100 %), ou seja, quase com concordância perfeita.

Tabela 4 - Índice Kappa das amostras analisadas e os resultados segundo principais autores.

Amostra	Índice Kappa	Classificação de qualidade temática segundo autores		
		Congalton e Green (2019)	Fleiss, Cohen e Everitt (1969)	Monserud e Leemans (1992)
1	0,93	quase perfeito	excelente	excelente
2	0,91	quase perfeito	excelente	excelente
3	0,89	quase perfeito	excelente	excelente
4	0,96	quase perfeito	excelente	excelente
5	0,95	quase perfeito	excelente	excelente
6	0,95	quase perfeito	excelente	excelente

Ao analisar a Tabela 5, a qual trata do percentual de acertos dos cálculos das alturas das árvores, nota-se que o algoritmo de individualização apresentou resultados melhores para as árvores mais altas.

Após determinar a localização geográfica de cada árvore dentro das amostras, uma nova análise foi realizada buscando-se estimar a altura de cada uma delas individualmente. Através do cruzamento dos pontos de localização com o MDS, aplicando-se a subtração do MDS do MDT, foi gerado o MDVn. Isso possibilitou o cálculo individualizado da altura das árvores.

Observou-se erro médio percentual (EMP) de 3% e o erro médio quadrático (EMQ) foi de 1 %, ambos baixos, indicando que a metodologia aplicada apresentou um desempenho satisfatório para estimativa da altura das árvores.

Tabela 5 - Percentual de acertos por intervalo de altura.

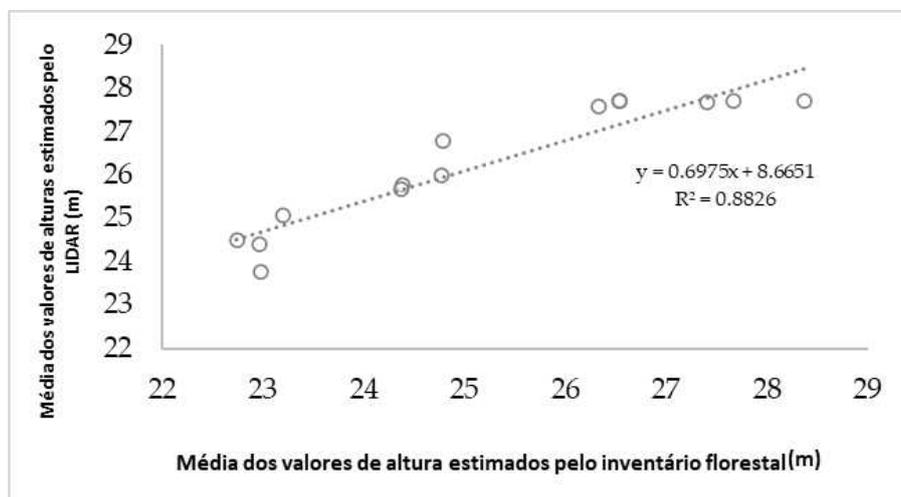
Intervalo de Altura (m)	Percentual de Acertos
0 - 18	20%
18 - 20	43%
20 - 22	90%
22 -24	99%
24 - 26	100%

Outra constatação é de que a média dos valores de altura aferidos em campo (medidas de amostra de ao menos 30 alturas em campo, citadas no início do item da metodologia) é maior que a média dos valores de altura estimados. Essa tendência em análises realizadas em dados baseados em tecnologia *LIDAR* já foi indicada em outros trabalhos, tais como em Nilsson (1996).

No intuito de enriquecer a análise de altura das árvores, uma comparação adicional entre os dados de campo e os dados do *LIDAR* foi realizada. Tendo em vista que os métodos tradicionais de mensuração florestal realizados em campo indicam, dentre outras informações, a altura das árvores mais altas, na forma de uma estimativa para as cem maiores árvores de uma área de estudo (H100) realizou-se a comparação desses dados com os dados correspondentes dos 13 talhões presentes na área de estudo, considerando-se além das seis amostras até o momento analisadas.

Através da comparação dos valores de H100 estimados pelo inventário e pelo *LIDAR* apresentados na Figura 4, é possível perceber que há uma alta correlação entre os dados, uma vez que o coeficiente de determinação R^2 obtido foi de 0,8826. Esse coeficiente oscila entre 0 e 1, revelando assim, o quanto o modelo consegue explicar os valores observados. Quanto maior o valor de R^2 , mais explicativo é o modelo e melhor se ajusta à amostra, conforme já discutido na parte teórica, atendendo aqui a 88,26%.

Figura 4 - Gráfico de correlação entre os valores de H100 estimados pelo inventário florestal (eixo X) e pelo *LIDAR* (eixo Y).



Esse desempenho indica o potencial uso dessa metodologia para auxiliar estudos e análises que buscam unicamente identificar as árvores de maior altura, uma vez que essas são classificadas, por exemplo, como a melhor medida direta de produtividade de um solo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho aqui realizado revela que as ortofotos de melhor resolução (com *pixel* de dimensões menores que 15 cm), bem como os subprodutos MDS e MDT, provenientes do sistema de varredura laser aerotransportado, possibilitam a modelagem da biomassa de superfície de plantios de eucaliptos (estimativa de produtividade de celulose), a partir de dados mais precisos da altura e a posição das suas árvores. Com base nos resultados obtidos, a metodologia empregada sugere grande potencial de aplicação em outros cultivos, o que proporcionaria enormes benefícios.

Os resultados apresentados demonstram que é possível realizar a identificação de árvores individuais com precisão adequada por meio da metodologia proposta. A estimativa de altura dos indivíduos também se mostrou satisfatória, aproximando-se muito do valor médio aferido em campo.

Este estudo comprova a viabilidade técnica da utilização de dados provenientes da tecnologia *LIDAR*. Os resultados são promissores. Entretanto, novos estudos devem ser estimulados para o aperfeiçoamento da metodologia utilizada, tais como a possibilidade de aplicações de outros algoritmos visando a estabelecer critérios de comparação dos dados obtidos, de maneira a melhorar a acurácia dos resultados.

Em termos de equipamentos e veículos aéreos também utilizados, podem ser empregados outros recursos, tais como o laser scanner terrestre e os sensores *LIDAR* embarcados em VANTs de asa fixa ou DRONES, esses últimos amplamente disseminados e empregados em várias pesquisas na atualidade. Isso se viabiliza mais ainda pela grande evolução que vem ocorrendo em termos de sensores de captação de informações com as tecnologias dos VANTs/DRONES, que possibilitam melhores resoluções espacial, espectral, radiométrica e temporal, principalmente. Paralelamente, vem ocorrendo a evolução dos sistemas de hardware e software, sendo uma grande promessa futura a possibilidade de processamento desses dados nas nuvens computacionais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior–CAPES e ao Conselho Nacional de Pesquisa-CNPq pela concessão de bolsas de mestrado.

REFERÊNCIAS

ABREU JÚNIOR, C. A. M.; VINHAL, G. P.; XAVIER, L. C. M.; MARTINS, G. D.; VIEIRA, B. S. Mapeamento de nematoides na cultura cafeeira a partir de imagens multiespectrais obtidas por aeronaves remotamente pilotadas. **Caminhos de Geografia**, v. 21, n. 76, p. 72-84, 2020. <https://doi.org/10.14393/RCG217651255>

ANDERSEN, H. E.; REUTEBUCH, S. E.; MCGAUGHEY, R. J. A rigorous assessment of tree height measurements obtained using airborne LIDAR and conventional field methods. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 32, n. 5, p. 355-366, 2006. <https://doi.org/10.5589/m06-030>

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: Perguntas e respostas**. Viçosa: UFV, 4ª ed. 2013, 605 p.

COELHO FILHO, L. C. T.; BITTENCOURT, S. P.; BRITO, J. L. N. S. Estudo de viabilidade de atualização cadastral de bases 1:2000 do município do Rio de Janeiro através de mosaicos de imagens orbitais de alta resolução. **Caminhos de Geografia**, v. 20, n. 71, p. 459-471, 2019. <https://doi.org/10.14393/RCG207146173>

CONGALTON, R.G.; GREEN, K. **Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices**. 3a Ed.; Nova York, Boca Raton: CRC Press, 328 p.; 2019.

<https://doi.org/10.1201/9780429052729>

ESRI - Environmental System Research Institute. **Software ArcGIS 10.3.1**. 2016.

FERRAZ, A. S.; SOARES, V. P.; SOARES, C. P. B.; RIBEIRO, C. A. A. S.; BINOTI, D. H. B.; LEITE, H. G. Estimativa do estoque de biomassa em um fragmento florestal usando imagens orbitais.

Floresta e Ambiente, Seropédica, v. 21, n. 3, p. 286-296, 2014. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.052213>

FERRELLI, F.; BRENDEL, A. S.; PERILLO, G. M. E.; PICCOLO, M. C. Validação de produtos por satélite através de medições do situ para monitorar coberturas terrestre no Sul de Pampas (Argentina). **Caminhos de Geografia**, v. 21, n. 76, p. 190-207, 2020.

<https://doi.org/10.14393/RCG217654051>

FLEISS, J. L.; COHEN, J.; EVERITT, B. S. Large sample standard errors of kappa and weighted kappa. **Psychological Bulletin**, v. 72, n. 5, p. 323–327, 1969. <https://doi.org/10.1037/h0028106>

FOODY, G. M. Explaining the unsuitability of the kappa coefficient in the assessment and comparison of the accuracy of thematic maps obtained by image classification. **Remote Sensing of Environment**, v. 239, n. January, p. 111630, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111630>

GAMA, A. T.; CABACINHA, C. D.; MEIRA, M. R.; LEITE, M. V. S. Estimativas volumétricas y hipsométricas para el Barbatimão em el norte de Minas Gerais. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 22, n. 4, p. 483-493, 2015. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.090314>

IBÁ-Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório 2017**. Disponível em:

https://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf Acesso em: 01 fev. 2019.

INOMATA, T.; TRIADAN, D.; PINZÓN, F.; BURHAM, M.; RANCHOS, J. L.; AOYAMA, K.; HARAGUCHI, T. Archaeological application of airborne *LIDAR* to examine social changes in the Ceibal region of the Maya lowlands. **PLoS ONE**, v.13, n.02, p. 1-38, 2018.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191619>

KAARTINEN, H.; HYYPPÄ J, Y. U. X.; VASTARANTA, M.; HYYPPÄ, H.; KUKKO A. An international comparison of individual tree detection and extraction using airborne laser scanning. **Remote Sensing**. v. 4, n. 4, p. 950–974, 2012. <https://doi.org/10.3390/rs4040950>

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The Measurement of Observer Agreement of Categorical Data.

Biometrics, v. 33, n. 1, p. 159–174, 1977. <https://doi.org/10.2307/2529310>

LUNDGREN W. J. C.; SILVA, J. A. A.; FERREIRA R. L. C. Influência do tipo de amostragem na estimativa de volume de madeira de eucalipto por krigagem. **Florestas e Ambiente**, Seropédica, v. 23, n. 4, p. 511-523, 2016. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.136315>

MONSERUD, R. A.; LEEMANS, R. Comparing global vegetation maps with the Kappa statistic.

Ecological Modelling, v. 62, n. 4, p. 275–293, 1992. [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(92\)90003-W](https://doi.org/10.1016/0304-3800(92)90003-W)

MULLER, M.; KERSTING, A. P. G.; NAKAJIMA, N. Y.; HOSOKAWA, R. T.; ROSOT, N. C. Influence of flight configuration used for LIDAR data collection on individual trees data extraction in forest plantations. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 44, n. 2, p. 279-290, 2014.

<https://doi.org/10.5380/rev.v44i2.34045>

NILSSON, M. Estimation of tree heights and Talhão volume using an airborne *LIDAR* system. **Remote Sensing of Environment**, v.56, p. 1-7, 1996. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00224-3](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00224-3)

OLIVEIRA, A. L. S. **Modelagem espacial de predição de riscos de incêndios com lógica fuzzy, comparação e validação**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Pernambuco: Recife, 2013, 161 p. Disponível em:

<https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/10235/1/DISSERTA%c3%87%c3%83O%20Andr%c3%a9%20Lu%c3%adz%20S%c3%a1%20de%20Oliveira.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2021.

- OLIVEIRA, A. L. S.; NERO, M. A.; TAVARES JUNIOR, J. R.; CANDEIAS, A. L. B.; NÓBREGA, R. A. A. Comparação e validação da modelagem espacial de riscos de incêndios considerando diferentes métodos de predição. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 23, p. 556-577, 2017. <https://doi.org/10.1590/s1982-21702017000400037>
- OLIVEIRA, L. T.; CARVALHO, L. M. T.; FERREIRA, M. Z.; OLIVEIRA, T.C.A.; ACERBI JUNIOR, F. W. Application of LIDAR to forest inventory for tree count in stands of Eucalyptus sp. **CERNE (UFLA)**, Lavras, v. 18, p. 175-184, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0104-77602012000200001>
- OSHIO, H.; ASAWA, T.; HOYANO, A.; MIYASAKA, S. Accuracy of the Information on the External Crown Form of Individual Trees Extracted by Airborne LIDAR in Urban Spaces. **Journal of The Remote Sensing Society of Japan**, v.33, n. 5, p.350-359, 2013.
- OSSOLA, A.; HOPTON, M. E. Measuring urban tree loss dynamics across residential landscapes. **Science of the Total Environment**, v. 612, p. 940-949, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.103>
- PEREIRA, J. L. G.; RENNÓ, C. D.; FERREIRA, L. V.; SALES, G. M.; THALÊS, M.;POCCARD-CHAPUIS, R. Avaliação de técnicas de generalização de dados matriciais (raster) aplicadas ao dado do TerraClass. **Caminhos de Geografia**, v. 19, n. 65, p. 269-285, 2018. <https://doi.org/10.14393/RCG196520>
- REFLORE – Associação Sul-Matogrossense de Produtores e Consumidores de Florestas Plantadas. **Florestas Plantadas MS**. 2015. Disponível em: <http://reflore.com.br/dados/florestas-plantadas-ms>. Acesso em: 25 out. 2015.
- ROSA, R. M.; FERREIRA, V. O.; BRITO, J. L. S. Mapa de reconhecimento geológico da Bacia do Rio Uberabinha (MG): procedimento experimental utilizando coeficientes de concordância. **Caminhos de Geografia**, v. 21, n. 76, p. 72-84, 2019. <https://doi.org/10.14393/RCG207042721>
- SCHIMALESKY, V.; CENTENO J. A. S. Avaliação da qualidade da informação altimétrica derivada da varredura a laser em uma região coberta por vegetação: Estudo de caso. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 4, p. 597-606, 2007. <https://doi.org/10.5380/rev.v38i4.13155>
- SCHRÖDER, T.; PEREIRA, L. D.; HOFIÇO, N. S. A. Comparação de Métodos de Estimativa de Volume Total para *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 20, n. 4, p. 480-486, 2013. <https://doi.org/10.4322/floram.2013.041>
- SILVA, I. L. G.; SILVA, C. A.; KLAUBERG, C.; MELLO, J. M. Detecção de árvores individuais em área florestal mista de coníferas por meio de dados LIDAR aerotransportando. **Advances in Forestry Science**, Cuiabá, v.4, n.2, p.107-112, 2017.
- SILVA, C. A.; HUDAK, A. T.; VIERLING, L. A.; LOUDERMILK, E. L.; BRIEN, J. J.; HIERS, J. K.; JACK, S. B.; BENECKE, C. G.; LEE, H.; FALKOWSKI, M. J.; KHOSRAVIPOUR, A. Imputation of Individual Longleaf Pine (*Pinus palustris* Mill.) Tree Attributes from Field and *LIDAR* Data. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 42, n. 5, p. 554-573, 2016. <https://doi.org/10.1080/07038992.2016.1196582>
- SILVEIRA, P. Estimativa da biomassa e carbono acima do solo em um fragmento de floresta ombrófila densa utilizando o método da derivação do volume comercial. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 40, n. 4, p. 789-800, 2010. <https://doi.org/10.5380/rev.v40i4.20330>
- SOUSA, I. M. P.; CARVALHO, E. V.; BATISTA, A. C.; MACHADO, I. E. S.; TAVARES, M. E. F.; GIONGO, M. Identification of burned areas by special index in a cerrado region of the state of Tocantins, Brazil. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 48, n. 4, p. 553-562, 2018. <https://doi.org/10.5380/rev.v48i4.57362>
- SUÁREZ, J. C.; ONTIVEROS, C.; SMITH, S.; SNAPE, S. Use of airborne *LIDAR* and aerial photography in the estimation of individual tree heights in forestry. **Computers & Geosciences**, v.31, n. 2, p. 253-262, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2004.09.015>

WANG, K.; WANG, T.; LIU, X. A Review: Individual Tree Species Classification Using Integrated Airborne LIDAR and Optical Imagery with a Focus on the Urban Environment. **Forest**, v10, n.1, p. 1-18, 2019. <https://doi.org/10.3390/f10010001>

ZANDONÁ, D. F.; LINGNAU, C.; NAKAJIMA, N. Y. Varredura a Laser aerotransportado para estimativa de variáveis dendométricas. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 36, n. 80, p. 295-306, 2008.

ZONETE, M. F.; RODRIGUEZ L. C. E.; PACKALÉN, P. Estimação de parâmetros biométricos de plantios clonais de eucalipto no sul da Bahia: uma aplicação da tecnologia laser aerotransportada. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 38, n. 86, p. 225-235, 2010.

Recebido em: 08/04/2021

Aceito para publicação em: 14/07/2021