

## Comparison of detection methods for vegetable individuals from the Caatinga using airborne LiDAR data

Adriana A. M. Nishiwaki<sup>\*</sup>, Magna S. B. de Moura<sup>\*\*</sup>, Josicléda D. Galvêncio<sup>\*\*\*</sup>, Cloves V. B. dos Santos<sup>\*</sup>, Hérica F. de S. Carvalho<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> Doutorando(a) do Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente-PRODEMA, Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, Brasil. E-mails: adri\_megumi@yahoo.com.br (autor correspondente), clovesvilasboas@gmail.com, hericafernanda\_17@hotmail.com

<sup>\*\*</sup> Pesquisadora da Embrapa Semiárido e Profa. Dra. do PRODEMA, Pernambuco, Brasil. E-mail: magna.moura@embrapa.br

<sup>\*\*\*</sup> Profa. Dra. Departamento de Ciências Geográficas e do PRODEMA, Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, Brasil. E-mail: josicleda.galvencia@ufpe.br

Received 28 September 2021 ; accepted 22 November 2021

### Abstract

By performing data surveys quickly and efficiently, the laser scanning system has been widely applied for several purposes. In forestry application, many studies use LiDAR data to estimate forest inventory data. The present study aims to estimate the number of trees and their respective total heights, using different algorithms in order to compare their efficiency. In the field, individuals with DBH  $\geq 3$  cm were counted. LiDAR data were obtained from the Pernambuco Tridimensional Project – PE3D platform and processed in R software. The detection of individuals was carried out using point clouds and the CHM, both through the application of the Maximum Local Filter with a window of variable size based on in the relationship between the crown diameter and the individual's total height. In the CHM generation, two different algorithms were used (point-to-raster and pitfree), at different resolutions (0.5 and 1 in point-to-raster and 0.5 in pitfree) and smoothing with a median filter applied in the CHMs created by the point-to-raster algorithm, totaling six different types of CHM. The use of low-density point clouds for detecting individuals was shown to be inferior compared to the use of CHM, even in relation to CHM with wells. The smoothing method with a resolution of 0.5 m showed the best response in identifying the trees among the analyzed methods, contrasting with the technique used to remove the pits (pitfree), which revealed low precision, however, it obtained significant results in the estimation of height of trees.

Keywords: algorithm, point cloud, CHM, point-to-raster, pitfree.

### Comparação de métodos de detecção de indivíduos vegetais da Caatinga a partir de dados LiDAR aerotransportado

#### Resumo

Por realizar levantamentos de dados de forma rápida e eficiente, o sistema de varredura a laser tem sido bastante aplicado para diversas finalidades. Na aplicação florestal, muitos estudos utilizam dados de LiDAR para estimar dados de inventários florestais. O presente estudo visa estimar o número de árvores e suas respectivas alturas totais, usando diferentes algoritmos com o intuito de comparar a eficiência dos mesmos. Em campo, foram contabilizados indivíduos com DAP  $\geq 3$  cm. Os dados LiDAR foram obtidos na plataforma do Projeto Pernambuco Tridimensional – PE3D e processados em software R. A detecção de indivíduos foi feita a partir das nuvens de pontos e do CHM, ambas por meio da aplicação do Filtro Local Máximo com janela de tamanho variável baseada na relação entre o diâmetro da copa e a altura total do indivíduo. Na geração do CHM, foram utilizados dois diferentes algoritmos (point-to-raster e pitfree), em diferentes resoluções (0,5 e 1 em point-to-raster e 0,5 em pitfree) e suavizações com um filtro de mediana aplicado nos CHMs criados pelo algoritmo point-to-raster, totalizando seis tipos diferentes de CHM. O uso de nuvens de baixa densidade de pontos para detecção de indivíduos demonstrou-se inferior comparado ao uso de CHM, mesmo em relação ao CHM com poços. O método de suavização com resolução de 0,5 m apresentou melhor resposta na identificação das árvores dentre os métodos analisados, contrastando com a técnica usada para remover os poços (pitfree), que revelou baixa precisão, no entanto, obteve resultados significativos na estimativa de altura das árvores.

Palavras-chave: algoritmo, nuvem de pontos, CHM, point-to-raster, pitfree

## 1. Introdução

As tecnologias de sensoriamento remoto têm sido profícuas na obtenção e manipulação de dados florestais (Giongo et al., 2012). O sistema de varredura a laser (*Light Detection and Ranging* - LiDAR) é uma delas, a qual tem a capacidade de efetuar medidas diretas, como altura do dossel, diâmetro de copa e número de indivíduos, bem como estimativas de variáveis dendrométricas por meio de modelagem, como por exemplo biomassa e volume (Giongo et al., 2010).

Em áreas florestais, geralmente, os primeiros retornos são originários dos pontos mais elevados do dossel, o que configura o modelo digital de superfície (MDS). Já os últimos retornos, muitas vezes, derivam da superfície do terreno, o que constitui o modelo digital de terreno (MDT). Entretanto, nem todos os pontos resultantes dos últimos retornos correspondem à superfície do solo, sendo necessário a retirada dos mesmos, normalizando as nuvens de pontos, para criar o modelo de altura de dossel (CHM). O êxito na predição das alturas está relacionado à qualidade desses modelos gerados, que, por sua vez, dependem da qualidade da varredura, na qual deve ser considerada a taxa de penetração na vegetação até o solo (Giongo et al., 2010).

O CHM pode apresentar poços ou buracos (conhecida como *pit*), que representam irregularidades na elevação da superfície do dossel, o que resulta em ruídos no modelo, bem como em erros ou imprecisões na detecção de indivíduos consequentemente nas medições biofísicas (Ben-Arie et al., 2009; Jamru, 2018). Tais expressões disruptivas no CHM ainda não possuem uma causa específica, podendo ser promovidas por diversos fatores, desde a obtenção de dados até o pós-processamento (Ben-Arie et al., 2009).

Por meio dos resultados de Kraus e Pfeifer (1998), Khosravipour et al., 2014 constataram que os poços podem ser criados no processo da classificação de pontos provenientes do solo ao elaborar MDS ou MDT, dependendo da técnica de classificação e da densidade de pontos LiDAR. Outras causas associadas à formação dos poços revelam que a variação na elevação do dossel é ocasionada pelos diversos feixes de laser de diferentes linhas de voo, assim como pelos feixes que ultrapassam a copa antes de gerar o primeiro retorno para configurar a superfície das copas (Persson et al., 2002; Leckie et al., 2003; Jamru, 2018). Contudo, Ben-Arie et al. (2009) chama atenção para a distinção entre os poços e as lacunas do dossel, referindo as lacunas como aberturas naturais assimétricas, usualmente formado por vários pixels, diferentemente dos poços, que se apresentam em tamanhos diminutos.

Dentre as técnicas de detecção de árvores, o

filtro de máximo local (LM) é bastante aplicado nos estudos com este objetivo (Popescu et al., 2003; Oliveira et al., 2012; Hirata et al., 2009). Esta técnica se fundamenta no pressuposto de que o ponto de maior elevação mensurado em uma única copa de árvore corresponde ao ápice da árvore (Popescu et al., 2002). Uma das práticas que irá determinar a precisão das localizações dos indivíduos é a escolha criteriosa da dimensão da janela de busca do filtro (Popescu et al., 2002).

Considerando que há diversos tamanhos de copas de árvores, o uso de filtro LM de janela variável torna-se um recurso adequado na busca e identificação de indivíduos, uma vez que é feito um ajuste automático do tamanho do filtro à estrutura espacial apresentada pelos dados LiDAR (Popescu et al., 2004). Em vegetação heterogênea, esta técnica é bastante apropriada.

Além de ser utilizada para denominar a biodiversidade que ocorre na região semiárida do nordeste brasileiro, a expressão Caatinga, também é aplicada para qualificar uma ampla área geográfica com diversos tipos de vegetação. As taxas de temperatura e precipitação da Caatinga classificam a área como uma floresta tropical sazonal (Albuquerque et al., 2012).

Com esta classificação, a Caatinga integra o bioma global denominado de Florestas e Arbustais Tropicais Sazonalmente Secas (FATSS), que se caracteriza pela ampla variação na estrutura da vegetação, ocorrendo desde florestas a arbustais xerófilos, sendo esta última composta por árvores de baixo porte distribuídas de modo disperso e por arbustos em maior número (Fernandes e Queiroz, 2018).

Tem-se registrada uma crescente taxa de supressão da vegetação da Caatinga, sobretudo em virtude da pressão econômica na região. Desse modo, estratégias para a sua conservação são fundamentais para impedir grandes perdas de habitat e desertificação, para preservar os principais serviços ecológicos fundamentais para a qualidade de vida da população da região, e para viabilizar o uso sustentável dos recursos naturais (Leal et al., 2005).

Portanto, a tecnologia LiDAR pode ser excelente ferramenta no embasamento das estratégias para a conservação da Caatinga, por fornecer dados florestais necessários para caracterização da área. O presente estudo visa estimar o número de árvores e suas respectivas alturas totais, usando diferentes algoritmos do software R com o intuito de comparar a eficiência dos mesmos.

## 2. Material e métodos

### Área de estudo

O estudo foi desenvolvido na área

experimental da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) Semiárido, localizada nas coordenadas 9,05°S e 40,32°W no município de Petrolina, Pernambuco (Figura 1). O município apresenta clima do tipo *Bsw*, de acordo com a classificação de Köppen, que se refere a uma região de clima árido, com precipitações concentradas entre os meses de janeiro e abril (Teixeira et al., 2002). A

precipitação média anual é cerca 435 mm (Jatobá et al., 2017), com médias anuais de temperatura do ar superior a 24°C, podendo atingir acima de 26°C (Teixeira, 2010).

A vegetação do município é caracterizada pela caatinga hiperxerófila, que se encontram entre as culturas agrícolas irrigadas, com avanço progressivo sobre a vegetação natural (Jatobá et al., 2017).

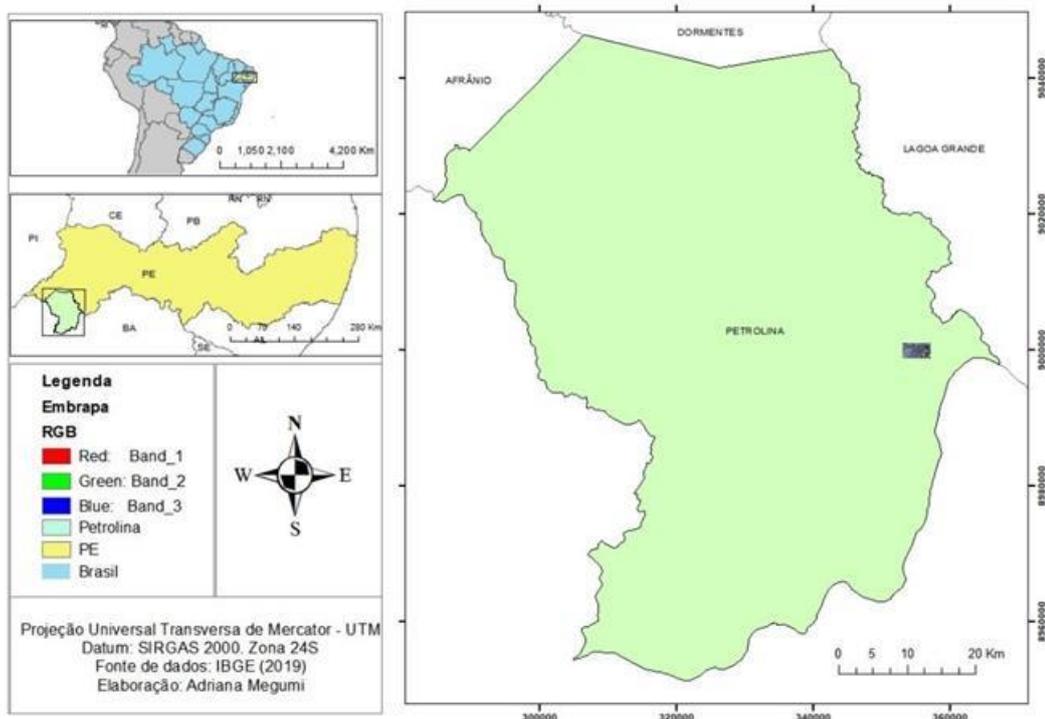


Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo situada no município de Petrolina-PE.

Para abordagem em nível de povoamento, foram definidas 5 parcelas de 100 m<sup>2</sup>, as quais juntas contém, no total, 180 indivíduos. Foram contabilizadas os indivíduos arbustivo-arbóreos com diâmetro à altura do peito (DAP) maior que 3 cm. Em setembro de 2019, mesmo período sazonal (seco) da realização da varredura a laser, foram aferidos o diâmetro das copas com auxílio de uma trena e a altura total com varas graduadas. É importante destacar dois pontos que fundamentam a estabilidade do desenvolvimento vertical da área que possa influenciar o estudo: o período relativamente longa de conservação da área, superior a 40 anos, e a não ocorrência de incremento substancial de estatura das árvores da Caatinga em vegetação madura (Ferraz et al., 2014). Observou-se que alguns estudos com dados ALS também realizaram as coletas de dados de campo e de LiDAR em períodos divergentes (Galvêncio e Popescu, 2016; Oliveira et al., 2021).

#### Banco de dados

Foram utilizados os dados LiDAR do Programa Pernambuco Tridimensional – PE3D, base de dados resultante, inicialmente, da necessidade de

dados altimétricos para formulação de projetos de barragens para controle de cheias na Mata Sul de Pernambuco. Posteriormente, o mapeamento estendeu para todo o território do estado, devido à inclusão desta execução como meta no Programa de Sustentabilidade Hídrica de Pernambuco (PSHPE).

A varredura foi realizada em agosto de 2014, utilizando o perfilador a laser aerotransportado LEICA ALS-60, em uma altura (voo) de 2.600 m, com ângulo de abertura de 34,5°, funcionando em 93.200 Hz de repetição do laser e 36,8 Hz de frequência scanner, o que resultou em 0,5 ponto/m<sup>2</sup> de densidade de pontos, tendo como referencial geodésico o datum SIRGAS 2000 (Pernambuco, 2017).

#### Processamento de dados

Com o uso do software Fusion/LDV, inicialmente, foi filtrada a nuvem de pontos para identificar os retornos que se encontram na superfície do solo, utilizando a função *groundFilter*, cujo produto foi utilizado para gerar o modelo digital de terreno (MDT) por meio do uso da função *GridSurfaceCreate*. Posteriormente, foi feita a

normalização da nuvem, aplicando a função *ClipData* e em seguida, foi utilizada a função *PolyClipData* para fazer o recorte das parcelas amostrais, representadas em polígonos em formato shapefile.

No software R, utilizando o pacote lidR, foi feita a detecção dos indivíduos e medição das suas respectivas alturas a partir das nuvens de pontos e do CHM, ambas por meio da aplicação do Filtro Local Máximo com janela de busca baseada na relação entre o diâmetro de copa e a altura total dos indivíduos registrados em campo.

#### Algoritmos analisados

Na geração do CHM, foram utilizados dois diferentes algoritmos: point-to-raster (p2r) e pitfree. Para cada pixel do CHM, o algoritmo p2r atribui a altura do ponto mais elevado encontrado. Para resultar menos pixels vazios, o algoritmo pode trocar cada retorno por um círculo formado por oito pontos. No entanto, ocorrem poços quando a resolução for diminuta para a densidade de pontos. O algoritmo pitfree foi criado por Khosravipour et al. (2014), que consiste no cálculo de um conjunto de triangulações clássicas em diferentes alturas. Assim como o p2r, também pode ser feita a substituição dos retornos (Roussel et al., 2021).

Foram analisados o algoritmo p2r em duas diferentes resoluções espaciais (CHM p2r 0,5 m e CHM p2r 1 m) e suavizações destas com um filtro de mediana (CHM p2r 0,5 m smoothed e CHM p2r 1 m smoothed), totalizando quatro tipos de CHM resultante do p2r. O algoritmo pitfree foi aplicado com resolução de 0,5 m, sem e com ajuste de subcírculos (respectivamente, CHM pitfree 0.5 1 e CHM pitfree 0.5 2).

#### Análise da acurácia dos resultados de identificação dos indivíduos

Para analisar a acurácia das estimativas de levantamento de indivíduos foram calculadas os percentuais de acertos e as raízes do erro quadrático médio (RMSE), de acordo com a Equação 1:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(O_i - P_i)^2}{n}} \quad (1)$$

onde  $O_i$  são dados observados,  $P_i$  são dados estimados e  $n$  é número de parcelas.

### 3. Resultados e discussão

Ao relacionar o diâmetro da copa e a altura total dos indivíduos para dimensionar a janela de busca, foi obtida a equação polinomial presente na Figura 2. Devido à presença de evidentes *outliers*, a correlação apresentou um coeficiente de

determinação de 0,57, valor próximo aos encontrados nos estudos de Oliveira et al. (2018) ( $r^2=0,53$ ) realizado em povoamento de *Tectona grandis*, e de Padoin e Finger (2010) ( $r^2_{aj}=0,59$ ) em floresta de *Pinus taeda*.

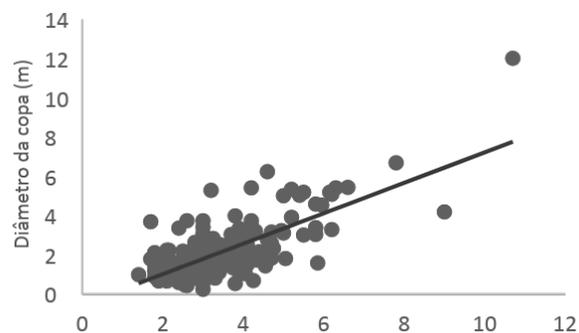


Figura 2 – Relação entre o diâmetro de copa e a altura total dos indivíduos registrados na área estudada.

Assim como é importante escolher o melhor método para detecção de plantas, a seleção do tamanho da janela também é crucial para o sucesso desse processo, uma vez que o tamanho inadequado pode causar erro (comissão ou omissão) (Popescu et al., 2002; Pouliot et al., 2005). Apesar do baixo valor do coeficiente de determinação da correlação, foi a dimensão da janela mais apropriada e específica para a área estudada.

Foram registrados no total 180 indivíduos vegetais, 42 arbustos e 138 árvores, com altura média de 3,4 m, altura mínima de 1,4 m e máxima de 10,7 m. Perfil semelhante foi verificado no estudo de Martins et al. (2020) realizado em Floresta (PE), onde registraram altura média de 3,5 m, mínima de 1,5 m e máxima de 7 m. No entanto, estudos realizados na caatinga da Paraíba (Cordeiro et al., 2017) e do Piauí (Brand et al., 2015) demonstraram estaturas ligeiramente superior, com altura média de 4,1 e 5,6 m, respectivamente.

A altura média estimada a partir dos dados LiDAR variou entre 3,0 e 3,4 m, destacando a nuvens de pontos e os dois CHM gerado pelo pitfree que resultaram na mesma altura média observada (3,4 m) (Tabela 1). Já por meio do algoritmo p2r foram obtidas alturas médias um pouco abaixo da registrada em campo (3 a 3,2 m), o que pode estar relacionado à presença de poços nos CHM. De acordo com Gaveau e Hill (2003), os poços ocasionaram a subestimativa da altura de árvores utilizando dados LiDAR com densidade de pontos de 0,21 pontos/m<sup>2</sup>.

A ligeira subestimativa de altura média encontrada pelo algoritmo p2r também foi obtida pelo método de suavização. Apesar da suavização dos valores dos pixels de CHM beneficiar os dados LiDAR de baixa precisão, ocorreu, possivelmente, a

omissão dos topos das árvores (Solberg et al., 2006; Khosravipour et al., 2014). A subestimativa de altura foi relatada em outros estudos que aplicaram técnicas de suavização, inclusive com filtragem por mediana (Ben-Arie et al., 2009; Zhang et al., 2020; Quan et al., 2021).

Tabela 1 – Comparativo dos dados observados e obtidos pelos diferentes métodos de identificação a partir de dados LiDAR

Método	Nº	H média	H máx	H mín
Observado	180	3,4	10,7	1,4
Nuvem de pontos	103	3,4	10	2
CHM p2r 0,5	115	3,2	10	2
CHM p2r 1	197	3,0	10	2
CHM p2r 0,5 smoothed	168	3,0	10	2
CHM p2r 1 smoothed	194	3,2	10	2
CHM pitfree 0,5 1	49	3,4	9	2
CHM pitfree 0,5 2	49	3,4	9	2

Nº: número de indivíduos registrados; H média: altura média; H máx: altura máxima; H mín: altura mínima.

É importante ressaltar que os resultados do filtro mediana são influenciados pelo tamanho adequado do kernel dada a variabilidade da dimensão do poço (Shamsoddini et al., 2013; Zhang et al., 2020). Assim, somente os poços com dimensão pequena são preenchidos de modo efetivo por kernels pequenos, porém ao usar kernel grande, tal filtro tem a tendência de suavizar demasiadamente o CHM

(Ben-Arie et al., 2009; Zhang et al., 2020). Quan et al. (2021) sugerem que o filtro de mediana não é apropriado para aplicações em árvores individuais baseado na detecção por LM ao utilizar um CHM de alta resolução.

A classe de altura predominante, representada por 63,7% do total observado, foi de 2 a 4 m, seguido da classe 4 a 6 m com 22,9%, o que denota uma vegetação característica da Caatinga de baixo a médio porte. Porte similar foi observado no trabalho de Guedes et al. (2012), no qual revelaram que a maioria dos indivíduos (60,3%) possuíam altura entre 3 e 5 m.

Exceto p2r 0,5 smoothed, que identificou mais indivíduos da classe até 2 m (47,6%), seguida da 2 a 4 m (37,5%), todos os métodos de identificação apresentaram a predominância da classe de 2 a 4 m, como foi verificado em campo, variando entre 40,8% (pitfree) e 62,4% (p2r 1 smoothed), porém a segunda classe predominante foi a de até 2 m, com taxas de 25,8% (p2r 1 smoothed) até 40% (p2r 0,5) (Figura 3). Em vista disso, pode-se perceber que houve uma subestimativa das alturas dos indivíduos identificados por todos os métodos aplicados, o que é confirmado notoriamente nas estimativas das alturas médias resultantes do algoritmo p2r (3,0 a 3,2 m), e discretamente pelo algoritmo pitfree, o qual, apesar de exibir percentuais das duas primeiras classes de altura (de até 4 m) semelhantes ao observado, 73,5% e 74,3%, respectivamente, estimou mais indivíduos da classe até 2 m em relação ao registrado em campo.

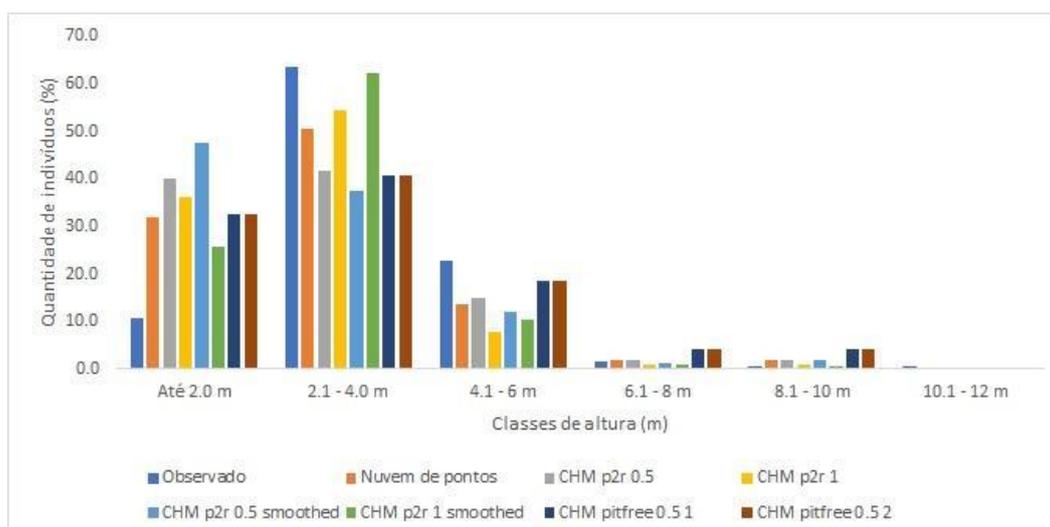


Figura 3 – Distribuição dos indivíduos em classes de altura.

Dentre as alturas estimadas pelos métodos, a terceira classe mais representativa foi a de 4 a 6 m, apresentando percentuais de 7,6% (p2r 1) a 18,4% (pitfree). Ao agrupar os indivíduos com altura acima de 4 m, constatou-se que o algoritmo pitfree apresentou percentuais próximo ao observado, 26,5%

e 25,7%, respectivamente, o que corrobora o fato dos poços subestimarem a altura das árvores, como revelado por Gaveau e Hill (2003), Ben-Arie et al. (2009) e Quan et al. (2021).

Percebeu-se que com o uso de CHM nos métodos, especificamente aplicando o algoritmo p2r

para a geração do raster, obteve maior precisão na detecção de indivíduos em relação a nuvem de pontos, obtendo uma variação de diferença de 6,8% a 52,7% (CHM p2r 0,5 de 6,8%, CHM p2r 0,5 smoothed de 36%, CHM p2r 1 smoothed de 51,7% e CHM p2r 1 de 52,7%) (Tabela 2). O acerto de 56,8% usando nuvem de pontos se encontra dentro do intervalo estimado por Yu et al. (2011) (43-96%), e abaixo em relação à taxa apresentada por Li et al. (2012) (86%). Além da baixa densidade de amostragem, essa subestimativa pode estar relacionada ao pequeno espaçamento entre os indivíduos, constatado nas parcelas estudadas pela ocorrência de emaranhamento de muitos arbustos, razão atribuída por Li et al. (2012) ao não detectar algumas plantas em parcelas densas.

Tabela 2 – Acurácia dos métodos de identificação de indivíduos.

Método	RMSE	% acerto
Nuvem de pontos	15,92	56,8
CHM p2r 0,5	14,7	63,6
CHM p2r 1	12,6	109,4
CHM p2r 0,5 smoothed	13,3	92,8
CHM p2r 1 smoothed	16,3	108,4
CHM pitfree 0,5 1	26,8	27,2
CHM pitfree 0,5 2	26,8	27,2

Foi verificada nos métodos, que utilizaram a resolução de 1 m (p2r 1 e p2r 1 smoothed), superestimativa de número de indivíduos na área total do estudo, com variação percentual para mais de 9,4% e 8,4%, respectivamente. O tamanho grande do pixel pode ter contribuído para o erro na detecção de árvores, visto que ocorre perdas de detalhes da copa (Hao et al., 2019). Ademais, os poços, por impactarem de modo adverso na configuração do CHM, torna confuso o reconhecimento da copa, acarretando a elevação de erros de comissão e omissão da identificação do topo dos indivíduos vegetais (Shamsoddini et al., 2013; Khosravipour et al., 2014; Quan et al., 2021).

Os resultados dos métodos com suavizações foram mais expressivos em termos percentuais de acertos, com 92,8% usando resolução de 0,5 e 108,4% empregando 1 m. Baseando-se no RMSE, o p2r 1 com valor de 12,6 se demonstrou mais eficiente, acompanhado do p2r 0,5 smoothed com RMSE de 13,3.

Em virtude dos resultados idênticos obtidos pelos dois métodos usando o algoritmo pitfree nas estimativas, demonstrou-se que não há diferença da aplicação do subcírculo com a mesma resolução espacial.

O algoritmo pitfree se destacou pela baixa

precisão na detecção de indivíduos, demonstrado pelo percentual de 27,2% de acerto (26,8 de RMSE), valor inferior aos encontrados por Khosravipour et al. (2014), cuja precisão de detecção foi de 51,5% das árvores decíduas, e por Jamru (2018), que obteve um índice de precisão de 69%. Entretanto, Shamsoddini et al. (2013) e Khosravipour et al., 2014 ratificam que a precisão da estimativa de parâmetros biofísicos das árvores, utilizando dados de baixa densidade de pontos, depende do algoritmo de remoção de poço escolhido.

#### 4. Conclusões

Com base na relação entre os diâmetros de copa e as alturas totais dos indivíduos da área de estudo, o uso de nuvens de baixa densidade de pontos para detecção de indivíduos demonstrou-se inferior comparado ao uso de CHM, mesmo em relação ao CHM com poços. O método de suavização com resolução de 0,5 m apresentou melhor resposta na identificação das árvores dentre os métodos analisados, contrastando com a técnica usada para remover os poços (pitfree), que revelou baixa precisão, no entanto, obteve resultados significativos na estimativa de altura das árvores.

Os resultados sugerem novos estudos utilizando outros métodos de retirada de poços e suavizações de CHM para comparações mais consistentes.

#### Agradecimentos

Ao Projeto ONDACBC – INCT/CAPES, pelo financiamento da pesquisa e à Embrapa Semiárido pelo suporte técnico.

#### Referências

- Albuquerque, U.P., Araújo, E.L., El-Deir, A.C.A., Lima, A.L.A., Souto, A., Bezerra, B.M., Ferraz, E.M.N., Freire, E.M.X., Sampaio, E.V.S.B., Las-Casas, F.M.G., Moura, G.J.B., Pereira, G.A., Melo, J.G., Ramos, M.A., Rodal, M.J.N., Schiel, N., Lyra-Neves, R.M., Alves, R.R.N., Azevedo Junior, S.M., Telino Junior, W.R., Severi, W., 2012. Caatinga revisited: ecology and Conservation of an Important Seasonal Dry Forest. *The Scientific World Journal* 2012, 1-18.
- Ben-Arie, J.R., Hay, G.J., Powers, R.P., Castilla, G., St-Onge, B., 2009. Development of a pit filling algorithm for LiDAR canopy height models. *Computers & Geosciences* 35, 1940-1949.
- Brand, M.A., Oliveira, L.C., Lacerda, S.R., Toniolo, E.R., Leal Júnior, G., Campello, R. B., 2015. Caracterização da vegetação da caatinga do sul do Piauí para geração de energia. *Floresta* 45, 477-

- Cordeiro, J.M.P., Souza, B.I., Felix, L.P., 2017. Florística e fitossociologia em floresta estacional decidual na Paraíba, nordeste do Brasil. *Gaia Scientia* 11, 1-16.
- Fernandes, M.F., Queiroz, L.P., 2018. Vegetação e flora da Caatinga. *Ciência e Cultura*, 70, 51-56.
- Ferraz, J.S.F., Ferreira, R.L.C., Silva, J.A.A., Meunier, I.M.J., Santos, M.V.F., 2014. Estrutura do componente arbustivo-arbóreo da vegetação em duas áreas de caatinga, no município de Floresta, Pernambuco. *Revista Árvore* 38, 1055-1064.
- Galvêncio, J.D., Popescu, S.C., 2016. Measuring individual tree height and crown diameter for mangrove trees with airborne with airborne Lidar data. *International Journal of Advanced Engineering, Management and Science* 5, 431-443.
- Gaveau, D.L.A., Hill, R.A., 2003. Quantifying canopy height underestimation by laser pulse penetration in small-footprint airborne laser scanning data. *Canadian Journal of Remote Sensing* 29, 650-657.
- Giongo, M., Koehler, H.S., Machado, S.A., Kirchner, F.F., Marchetti, M., 2010. LiDAR: princípios e aplicações florestais. *Pesquisa Florestal Brasileira* 30, 231-244.
- Giongo, M., Koehler, H.S., Viola, M.R., Bastos, P.S., Santos, A.F., Santopoli, G., 2012. Estimativa da altura da base das copas com o uso de dados laser scanning aerotransportado (LiDAR). *Journal of Biotechnology and Biodiversity* 3, 48-57.
- Guedes, R.S., Zanella, F.C.V., Costa Júnior, J. E. V., Santana, G.M., Silva, J.A., 2012. Caracterização florístico-fitossociológica do componente lenhoso de um trecho de caatinga no semiárido paraibano. *Revista Caatinga* 25, 99-108.
- Hirata, Y., Furuya, N., Suzuki, M., Yamamoto, H., 2009. Airborne laser scanning in forest management: individual tree identificaion and laser pulse penetration in a stand with different levels of thinning. *Forest Ecology and Management* 258, 752-760.
- Jamru, L.R., 2018. Correction pit free canopy height model derived from LiDAR data for the broad leaf tropical forest. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 169, 1-9.
- Jatobá, L., Silva, A.F., Galvêncio, J.D., 2017. A dinâmica climática do semiárido em Petrolina – PE. *Revista Brasileira de Geografia Física* 10, 136-149.
- Khosravipour, A., Skidmore, A.K., Isenburg M., Wang, T., Hussin, Y.A., 2014. Generating pit-free canopy height models from airborne lidar. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 80, 863-872.
- Kraus, K., Pfeifer, N., 1998. Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 53, 193–203.
- Leal, I.R., Silva, J.M.C., Tabarelli, M., Lacher JR.T.E., 2005. Mudando o curso da conservação da biodiversidade na Caatinga do Nordeste do Brasil. *Megadiversidade* 1, 139-146.
- Leckie, D., Gougeon, F., Hill, D., Quinn, R., Armstrong, L., Shreenan, R., 2003. Combined high-density lidar and multispectral imagery for individual tree crown analysis. *Canadian Journal of Remote Sensing* 29, 633–649.
- Li, W., Guo, Q., Jakubowski, M.K., Kelly, M., 2012. A new method for segmenting individual trees from the Lidar point cloud. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 78, 75-84.
- Martins, M.T., Marangon, G.P., Costa, E. A., Pfeifer, M.I., Lisboa, G.S., 2020. Relação hipsométrica de três espécies da Caatinga, semiárido pernambucano. *Agrarian Academy, Centro Científico Conhecer* 7, 45-55.
- Oliveira, L.T., Carvalho, L.M.T., Ferreira, M.Z., Oliveira, T.C.A., Acerbi Junior, F.W., 2012. Application of lidar to forest inventory for tree count in stands of *Eucalyptus* sp. *Cerne* 18, 175-184.
- Oliveira, T.M., Madi, J.P.S., Cerqueira, C.L., Millikan, P.H.K., Carvalho, M.P.L.C., Carvalho, S.P.C., 2018. Relações morfométricas para árvores de *Tectona grandis*. *Advances in Forestry Science* 5, 461-465.
- Padoin, V., Finger, C.A.G., 2010. Relações entre as dimensões da copa e altura das árvores dominantes em povoamentos de *Pinus taeda* L. *Ciência Florestal* 20, 95-105.
- Pernambuco, 2017. Relatório final de atividades executadas – Bloco V. Consórcio Águas de Pernambuco, Pernambuco.
- Persson, A., Holmgren, J., Söderman, U., 2002. Detecting and measuring individual trees using na airborne laser scanner. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 68, 925-932.
- Popescu, S. C., Wynne, R.H., Nelson, R. F., 2002. Estimating plot-level tree heights with lidar: local filtering with a canopy-height based variable window size. *Computers and Electronics in Agriculture* 37, 71-95.
- Popescu, S. C., Wynne, R.H., Nelson, R. F., 2003. Measuring individual tree crown diameter with lidar and assessing its influence on estimating forest volume and biomass. *Canadian Journal Remote Sensing* 29, 564-577.
- Popescu, S. C., Wynne, R.H., 2004. Seeing the trees in the forest: using Lidar and multispectral data fusion with local filtering and variable window size for estimating tree height. *Photogrammetric*

- Engineering & Remote Sensing 70, 589-604.
- Pouliot, D., King, D., Pitt, D., 2005. Development and evaluation of an automated tree detection delineation algorithm for monitoring regenerating coniferous forests. *Canadian Journal of Forest Research* 35, 2332-2345.
- Quan, Y., Li, M., Hao, Y., Wang, B., 2021. Comparison and evaluation of different pit-filling methods for generating high resolution canopy height model using UAV laser scanning data. *Remote Sensing* 13, 1-21.
- Roussel, J-R, Auty, D., Boissieu, F., Meador, A.S., Jean-François, B., Demetrios, G., Steinmeier, L., 2021. Airborne LiDAR data manipulation and visualization for forestry applications. CRAN. Disponível: <https://cran.r-project.org/web/packages/lidR/lidR.pdf>
- Shamsoddini, A., Turner, R., Trinder, J.C., 2013. Improving lidar-based forest structure mapping with crown-level pit removal. *Journal of Spatial Science* 58, 29-51.
- Solberg, S., Naesset, E., Bollandsas, O.M., 2006. Single tree segmentation using airborne laser scanner data in a structurally heterogeneous spruce forest. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 72, 1369-1378.
- Teixeira, A.H.C., Bassoi, L.H., Costa, W.P.L.B., Silva, J.A.M., Silva, E.E.G., 2002. Consumo hídrico da bananeira no Vale do São Francisco estimado pelo método da razão de Bowen. *Revista Brasileira de Agrometeorologia* 10, 45-50.
- Teixeira, A.H.C., 2010. Informações agrometeorológicas do polo Petrolina, PE/Juazeiro – 1963 a 2009. Embrapa Semiárido, Petrolina.
- Zhang, W., Cai, S., Liang, X., Shao, J., Hu, R., Yu, S., Yan, G., 2020. Cloth simulation-based construction of pit-free canopy height models from airborne LiDAR data. *Forest Ecosystems* 7, 1-13.