

EFEITOS DOS PARÂMETROS DE VOO EM UM SISTEMA DRONE-LIDAR SOBRE A NUVEM DE PONTOS EM APLICAÇÕES FLORESTAIS

Arthur Kaufmann Sanchez ¹, Danilo Roberti Alves de Almeida ¹, Silvio Henrique Menezes Gomes ², Luiz Carlos Estraviz Rodriguez ¹

¹Universidade de São Paulo - USP/ESALQ Caixa Postal 96 - 13416-000 - Piracicaba - SP, Brasil, {arthurkaufmann, daniloraalcer}@usp.br; ²BRCarbon, AgTech Garage, sala 7, Piracicaba, SP {danilo, silvio}@brcarbon.com.br

RESUMO

Foram realizados nove sobrevoos com sistema drone-LiDAR sob a mesma área em um fragmento de vegetação nativa de Mata Atlântica, localizado em Piracicaba-SP. Os voos variaram em relação às combinações de quatro parâmetros: altura de voo (100m e 120m), sobreposição de varredura do scanner (50% e 70%), número de retornos captados (dois e três) e modo de escaneamento (repetitivo e não-repetitivo). Estes parâmetros foram testados para avaliar sua influência na qualidade da nuvem de pontos para fins florestais, de modo a encontrar uma combinação que alie qualidade e eficiência na coleta. Na floresta de estudo houve diferença na penetração de pulsos até o solo, porém sem diferença na obtenção do modelo de altura do dossel (canopy height model - CHM). Com isso sugere-se uma combinação dos seguintes parâmetros: 120m de altura, 50% de sobreposição, retorno duplo e escaneamento não-repetitivo.

Palavras-chave — *sensoriamento remoto ativo, modelo de altura de dossel, Zenmuse L1.*

ABSTRACT

Nine overflights were carried out with drone-LiDAR system over the same area in a fragment of native vegetation of the Atlantic Forest, located in Piracicaba-SP. The flights varied in relation to the combination of four parameters: flight height (100m and 120m), scan overlap of the scanner (50% and 70%), number of returns captured (two and three) and scanning mode (repetitive and non-recurring). These parameters were tested to assess their influence on the quality of the point cloud for forestry purposes, in order to find a combination that combines quality and collection efficiency. In the study forest, there was a difference in the penetration of pulses to the ground, but without difference in obtaining the canopy height model (canopy height model - CHM). With this, a combination of the following parameters is suggested: 120m height, 50% overlap, double return and non-repetitive scan.

Key words — *active remote sensing, canopy height model, Zenmuse L1.*

1. INTRODUÇÃO

O monitoramento e estudo de florestas é uma atividade de grande importância, em especial no cenário atual de mudanças climáticas. Estudos acurados e em ampla são viáveis apenas com a utilização de sensoriamento remoto [1]. Sistemas embarcados em drone têm demonstrado grande potencial para o monitoramento florestal [2,3].

Diversas utilizações práticas podem ser realizadas com a tecnologia LiDAR. O manejo florestal sustentável na Amazônia pode ser planejado e monitorado de diversas maneiras, por exemplo, identificando árvores grandes potenciais para exploração [4]. Também é possível avaliar os impactos na floresta decorrentes do manejo [5]. Para isso utiliza-se modelos de altura do dossel (canopy height model - CHM) provenientes dos sistemas LiDAR. Outra aplicação promissora de métricas LiDAR é a estimativa de biomassa florestal acima do solo. O uso do CHM tem sido uma métrica bastante utilizada por possuir alta correlação com a biomassa [6,7]. O perfil vertical de vegetação também pode ser caracterizado com esta tecnologia, atributo que permite entender a estrutura da floresta e assim classificá-la em diferentes fisionomias ou estratos. Esta abordagem foi utilizada por [8] para otimizar atividades de amostragem na Floresta Amazônica a fins de reduzir custos e esforço.

A maior parte das métricas oriundas de nuvens LiDAR embarcados em drones estão relacionadas com a altura vertical dos pontos. Porém, a obtenção de tais métricas é altamente dependente do modelo digital do terreno (MDT), o qual utiliza os pontos que atingem o solo para ser gerado. O MDT é utilizado na chamada “normalização” dos pontos, em que a informação de altura do terreno que originalmente é registrada com dados de altitude local é convertida para zero.

Aspectos relacionados ao funcionamento do sensor podem influenciar na qualidade do escaneamento em termos de penetração e representação das superfícies, tais como o número de retornos captados ou o padrão de escaneamento. Existem diversos modelos de sensor atualmente no mercado, se tornando cada vez mais acessível o uso desta tecnologia. A fabricante de drones DJI entrou recentemente neste setor e lançou o módulo LiDAR-RGB denominado Zenmuse L1, que se acopla ao drone Matrice 300. Este equipamento vem

se popularizando e permite ao usuário configurar o sensor entre dois padrões de escaneamento bem como três níveis de captação de retornos.

Além do número de retornos e o modo de escaneamento, outros fatores também influenciam na densidade de pontos obtida pelo sistema drone-LiDAR. Dentre estes pode-se destacar a velocidade e altura de voo, frequência de emissão de pulsos e sobreposição das faixas de varredura. É preciso encontrar uma combinação destes parâmetros que permita ao mesmo tempo obter produtos de qualidade e eficiência na coleta. A altura de voo e sobreposição de faixas são parâmetros que interferem diretamente no número de linhas de voo que a aeronave irá realizar, consequentemente na duração das coletas e os recursos empregados [9].

O objetivo deste trabalho é avaliar os parâmetros de voo e sensor de um sistema drone-LiDAR para aplicações florestais. Mais especificamente foi avaliado o efeito dos parâmetros altura de voo, sobreposição de varredura, número de retornos e modo de escaneamento sob a qualidade da nuvem de dados lidar e a altura média do dossel. A partir dessa informação, buscou-se selecionar uma configuração de parâmetros que melhor adequa qualidade e eficiência de coleta.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

O estudo foi realizado em um remanescente florestal de Mata Atlântica na região de Piracicaba-SP (22°42' S, 47°34' W, altitude de 547 m acima do nível do mar). A fitofisionomia das florestas dessa região é de floresta estacional semidecidual [10]. O clima é seco no inverno e úmido no verão com precipitação média anual de 1.300 mm (média de 48 mm por mês no período seco entre abril e setembro). A temperatura média anual é de 21,6 °C com médias de 17,7°C em julho e 25°C em fevereiro, pela classificação de Köppen o clima é considerado Cwa [11].

2.2. Coleta de dados

Os dados foram coletados nos dias 20 e 21 de setembro de 2022, a partir de 9 sobrevoos (Figura 1) que mapearam a mesma cobertura florestal, um retângulo de 24 hectares. Investigou-se quatro fatores em dois níveis cada: altura de voo, sobreposição de varredura, número de retornos captados pelo sensor e modo de escaneamento. A velocidade de voo foi mantida constante em 10 m/s. No escaneamento com três retornos a frequência de emissão de pulsos é de 160kHz, já no com dois retornos é de 240 kHz. O campo de visão do sensor no modo repetitivo é de 70,4° (horizontal) e 4,5°(vertical), e no modo não-repetitivo é de 70,4° (horizontal) × 77,2° (vertical).

ID	Altura de voo(m)	Sobreposição(%)	N_retornos	Escaneamento	Tempo de voo (min)
1	100	50	triplo	não-repetitivo	12:25
2	100	70	triplo	não-repetitivo	18:53
3	100	50	duplo	não-repetitivo	12:25
4	100	70	duplo	não-repetitivo	18:53
5	120	50	triplo	não-repetitivo	10:43
6	120	70	triplo	não-repetitivo	16:33
7	120	50	duplo	não-repetitivo	10:43
8	120	70	duplo	não-repetitivo	16:33
9	100	70	triplo	repetitivo	18:53

Figura 1 – Combinações de parâmetros de voo e de sensor em cada tratamento.

O sistema utilizado (Figura 2) é composto pelo o drone Matrice 300, estação móvel GNSS D-RTK 2 e módulo Zenmuse L1, todos equipamentos da fabricante DJI. O Zenmuse L1 é um equipamento que se acopla ao drone e é composto por um sensor LiDAR Livox Avia, unidade de medição inercial (IMU) e câmera RGB.

2.3. Delineamento amostral

Para cada tratamento foi extraído uma amostra padrão da respectiva nuvem. Esta amostra foi utilizada para análise dos dados, a qual é composta por 114 unidades amostrais quadradas, com dimensão de 20x20m, independentes espacialmente umas das outras (Figura 2).

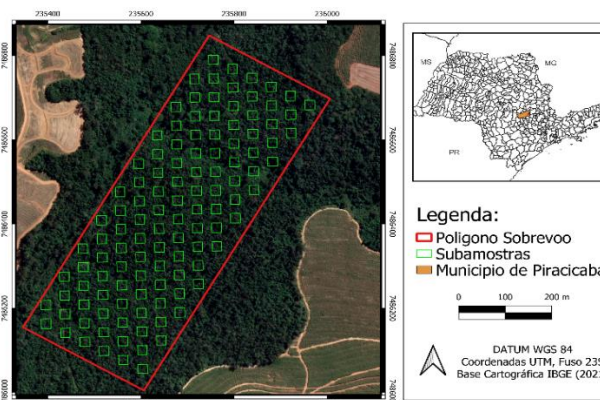


Figura 2 - Área sobrevoada (polígono vermelho) e as 114 unidades amostrais (quadrados verdes de 20x20m).

2.4. Processamento e análise dos dados

O Sistema drone-lidar gera a cada sobrevoos uma nuvem de pontos, a qual é transformada em formato “.LAS” através do software DJI terra. O processamento dos dados foi realizado em ambiente R com o uso das funções do LidR [12]. Para cada nuvem seguiu-se a mesma sequência de operações. Ao todo cinco produtos foram obtidos das nuvens de pontos para realização das análises.

O produto 1 foi um raster com o total de pontos em cada nuvem, com resolução de 1m². Para obter os outros produtos, as nuvens tiveram os pontos classificados como solo ou não-solo com o algoritmo Cloth simulation filtering (CSF). O produto 2 foi um raster com resolução de 1 m² que expressa

o número de pontos de solo por pixel. O produto 3 foi um MDT também no formato raster com o qual foi possível normalizar a nuvem, ou seja, atribuir valor zero de altura para os pontos de solo e valor de altura para os demais pontos, tendo o solo como referência. Em seguida foi aplicado um filtro que seleciona apenas retornos com menos de 50m para evitar ruídos, e então obtido o produto 4, um modelo de altura de copas (CHM - Canopy Height Model) com resolução de 1m.

Dos produtos 1 a 4 foi extraída para cada unidade amostral de 20x20m: média de pontos totais por m²; média de pontos de solo por m²; porcentagem de pixels com valor NA; média do CHM. Com isso obteve-se uma tabela com tais variáveis para as 114 unidades amostrais em cada tratamento. Foi aplicado testes ANOVA e posthoc Tukey entre os tratamentos para cada variável. O produto 5 consiste na distribuição de pontos ao longo do perfil vertical da floresta. Para isso a função “voxel metrics” do pacote lidR foi utilizada, a qual retorna o número de pontos dentro de um voxel de 1m³. Foi calculada a média de pontos por m³ até a altura máxima do dossel para cada tratamento.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A combinação de menor altura de voo e maior sobreposição resulta em mais pontos por m² que chegam até o dossel florestal, consequentemente maior a chance de penetrar até o solo. No outro extremo está a combinação entre maior altura e menor sobreposição, em que menos pontos chegam à superfície. Nas combinações “intermediárias” que alternam entre menor altura de voo e menor sobreposição e vice-versa, os resultados mostram que o desempenho pouco varia, indicando que os fatores altura e sobreposição, nas condições testadas neste experimento, possuem interferência equivalente na varredura de solo (Figura 3). Em relação ao número de retornos por pulso captados pelo sensor, dois ou três, não é clara uma superioridade entre uma das configurações para escanear o solo.

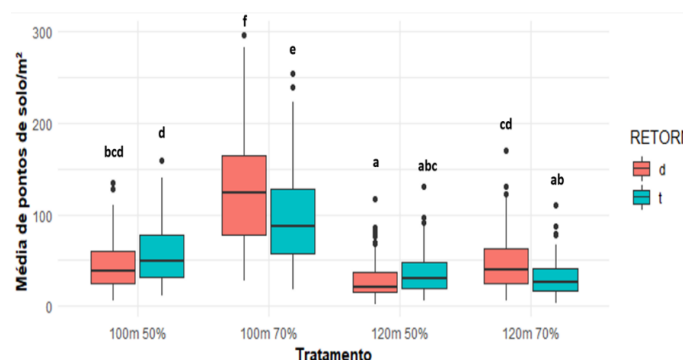


Figura 3 - Média de pontos/m² classificados como solo por tratamento de altura (m) e sobreposição de voo (%). As cores dos boxplots representam modos de retorno

Duplo(d) e Triplo (t). Resultados *posthoc* Tukey (letras “abcdef”).

Para avaliar o desempenho do modo de escaneamento do sensor, dois tratamentos tiveram os mesmos parâmetros com exceção do escaneamento, um repetitivo e outro não repetitivo. O modo de escaneamento não-repetitivo mostrou resultado superior ao repetitivo (p-value ANOVA = 5,898 e⁻¹³), apresentando uma média em torno de 75 e 50 pontos por metro quadrado, respectivamente (Figura 4). Outra análise para avaliar a porcentagem de pixels NA (sem retornos de solo) mostrou valor menor para o modo não-repetitivo, com média em torno de 5% e 18% para o não-repetitivo e repetitivo, respectivamente.

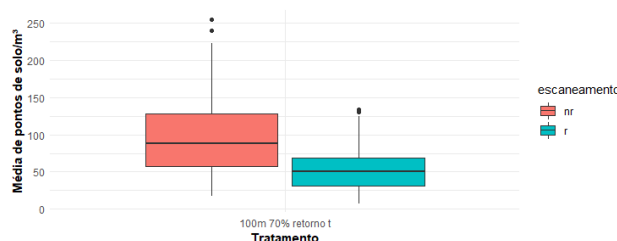


Figura 4 - Média de pontos/m² classificados como solo nos tratamentos com 100m de altura, 70% de sobreposição e retorno triplo. As cores dos boxplots representam modos de escaneamento não-repetitivo(nr) e repetitivo (r).

Foi colocado em comparação o desempenho do parâmetro de número de retornos, duplo ou triplo, ao longo do perfil vertical e em relação ao de total de pontos, fixando as outras variáveis. Os voos com retorno duplo tiveram mais pontos totais em todas as comparações de tratamentos. Ao longo de todo o perfil vertical o retorno duplo também apresentou mais pontos que o triplo (Figura 5). Apesar da diferença no número de pontos entre os tratamentos, o comportamento do perfil se manteve proporcionalmente mesmo. Quando se deseja obter informações a respeito da estrutura da floresta, busca-se por um maior detalhamento dos componentes ao longo do perfil, neste sentido o retorno duplo trás melhor esta riqueza de informações do que o triplo.

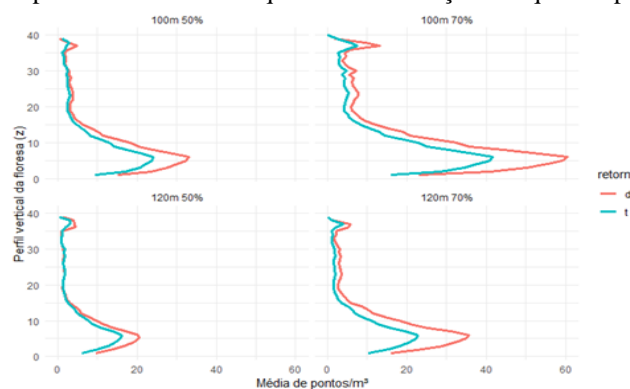


Figura 5 - Perfil vertical de retornos por tratamento de altura (m) e sobreposição de voo (%). As cores dos

boxplots representam modos de retorno Duplo(d) e Triplo (t).

Na análise da altura do dossel (média do CHM) não houve diferença significativa entre os tratamentos (Figura 6 - p-value ANOVA = 0.25). Em uma varredura drone-LiDAR os primeiros obstáculos atingidos são as copas das árvores, por isso gerar um modelo digital de superfície geralmente não é um problema. Porém, uma das principais métricas oriundas da nuvem de pontos, o CHM, apresenta maior dificuldade para ser obtido. Tal dificuldade se dá por distorções causadas por algumas razões, dentre elas está a alta irregularidade do terreno [13] ou a densidade da vegetação que não permite uma boa penetração dos pulsos para modelagem do terreno [14]. A área deste estudo não possui grandes irregularidades, portanto este não seria um problema para geração do CHM. Já a vegetação poderia ser um problema para penetração dos pulsos no solo, porém apesar de diferenças entre os tratamentos neste aspecto, não houve impacto na geração do CHM.

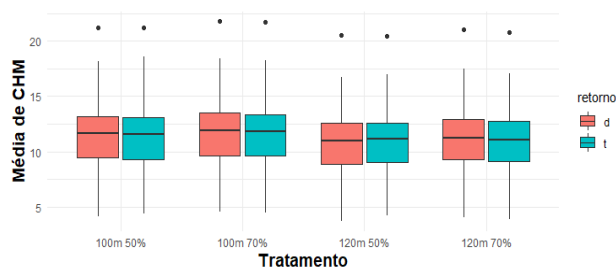


Figura 6 - Média de CHM por tratamento de altura (m) e sobreposição de voo (%). As cores dos boxplots representam modos de retorno Duplo(d) e Triplo (t).

5. CONCLUSÕES

Existe uma compensação (*tradeoff*) entre a altura de voo e sobreposição. O número de retornos não apresenta comportamento claro sobre qual nível, duplo ou triplo, desempenha melhor para escanear o solo. Contudo, em termos de quantidade de pulsos ao longo do perfil da vertical, o retorno duplo é superior. O modo de escaneamento não-repetitivo se mostrou mais eficiente para escaneamento do solo do que o repetitivo. Apesar das diferenças no escaneamento do solo, todos os tratamentos avaliados tiveram desempenho estatisticamente igual para gerar o CHM. Dessa forma, para varredura com drone-LiDAR em florestas com características estruturais semelhantes à deste estudo, em aplicações que utilizem o CHM como base, pode-se optar por um sobrevoos com maior eficiência operacional, no caso 120m de altura e 50% de sobreposição, e em termos de configuração de sensor, optar pelo retorno duplo e escaneamento não-repetitivo.

6. AGRADECIMENTOS

Arthur Kaufmann tem suporte da BRCarbon serviços ambientais LTDA. Danilo Almeida tem suporte da FAPESP (#18/21338-3).

7. REFERÊNCIAS

- [1] ALMEIDA, Danilo RA et al. A new era in forest restoration monitoring. *Restoration Ecology*, v. 28, n. 1, p. 8-11, 2020.
- [2] ALMEIDA, DRA d et al. Monitoring the structure of forest restoration plantations with a drone-lidar system. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 79, p. 192-198, 2019.
- [3] ALMEIDA, Danilo Roberti Alves et al. Detecting successional changes in tropical forest structure using GatorEye drone-borne lidar. *Biotropica*, v. 52, n. 6, p. 1155-1167, 2020.
- [4] REIS, Cristiano Rodrigues et al. Qualifying the Information Detected from Airborne Laser Scanning to Support Tropical Forest Management Operational Planning. *Forests*, v. 12, n. 12, p. 1724, 2021.
- [5] D'OLIVEIRA, Marcus Vinicio Neves et al. Impacts of selective logging on Amazon forest canopy structure and biomass with a LiDAR and photogrammetric survey sequence. *Forest Ecology and Management*, v. 500, p. 119648, 2021.
- [6] Longo, M., Keller, M., dos-Santos, M. N., Leitold, V., Pinagé, E. R., Baccini, A., ... Morton, D. C. Aboveground biomass variability across intact and degraded forests in the Brazilian Amazon. *Global Biogeochemical Cycles*, 30(11), 1639-1660, 2016.
- [7] DA COSTA, Máira Beatriz Teixeira et al. Beyond trees: Mapping total aboveground biomass density in the Brazilian savanna using high-density UAV-lidar data. *Forest Ecology and Management*, v. 491, p. 119155, 2021.
- [8] DE ALMEIDA PAPA, Daniel et al. Evaluating tropical forest classification and field sampling stratification from lidar to reduce effort and enable landscape monitoring. *Forest Ecology and Management*, v. 457, p. 117634, 2020.
- [9] MAGUYA, Almasi S.; JUNTILA, Virpi; KAURANNE, Tuomo. Algorithm for extracting digital terrain models under forest canopy from airborne LiDAR data. *Remote Sensing*, v. 6, n. 7, p. 6524-6548, 2014.
- [10] INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Mapa de vegetação do Brasil. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 2004
- [11] ALVARES, Clayton Alcarde et al. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- [12] ROUSSEL, Jean-Romain et al. lidR: Airborne LiDAR data manipulation and visualization for forestry applications. *R package version*, v. 1, n. 1, 2018.
- [13] KHOSRAVIPOUR, Anahita et al. Effect of slope on treetop detection using a LiDAR Canopy Height Model. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, v. 104, p. 44-52, 2015.
- [14] MENG, Xuelian; CURRIT, Nate; ZHAO, Kaiguang. Ground filtering algorithms for airborne LiDAR data: A review of critical issues. *Remote Sensing*, v. 2, n. 3, p. 833-860, 2010.