

**Universidade de São Paulo  
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Monitoramento da regeneração de plantios de restauração florestal  
com tecnologia Lidar**

**Alex Fernando Mendes**

Dissertação apresentada para obtenção do título de  
Mestre em Ciências, Programa: Recursos  
Florestais. Opção em: Conservação de  
Ecossistemas Florestais

**Piracicaba  
2023**

**Alex Fernando Mendes**  
**Engenheiro Florestal**

**Monitoramento da regeneração de plantios de restauração florestal com  
tecnologia Lidar**

versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:

Prof. Dr. **PEDRO HENRIQUE SANTIN BRANCALION**

Dissertação apresentada para obtenção do título de  
Mestre em Ciências, Programa: Recursos Florestais.  
Opção em: Conservação de Ecossistemas Florestais

**Piracicaba**  
**2023**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação**  
**DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP**

Mendes, Alex Fernando

Monitoramento da regeneração de plantios de restauração florestal com tecnologia Lidar / Alex Fernando Mendes. - - versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2023.

45 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

1. Regeneração natural 2. Monitoramento 3. Terrestrial Laser Scanning – Mobile 4. Airborne Laser Scanning – Unmanned Aerial Vehicle 5. Restauração ecológica 6. Restauração em larga escala 7. Restauração de paisagens florestais 8. Sensoriamento remoto I. Título

## DEDICATÓRIA

À Deus, pai, criador.

Aos meus pais, Inês e Ari, que tanto me apoiaram durante a minha formação pessoal e acadêmica.

À minha esposa, Clara, pelo fiel companheirismo.

## AGRADECIMENTOS

À Deus, pai, criador, o qual me deu forças e coragem para executar as atividades do mestrado, as atividades em meio a natureza permitiam sentir a Sua presença.

Meus pais, Ari e Inês, que tanto me apoiaram e durante a minha vida e trajetória acadêmica, incentivando para alçar voos. E a todos meus familiares que estiveram presentes durante este período.

À minha esposa, Clara que tanto me apoiou e compreendeu nos momentos difíceis e celebrou os momentos alegres.

Ao meu orientador e amigo, Prof. Dr. Pedro H. S. Brancalion pelos ensinamentos e orientações para a carreira acadêmica, pessoal e profissional.

À CNPq pela bolsa (133271/2020-0) cedida durante parte do meu mestrado.

À FAPESP, pelo financiamento junto ao NWO do Projeto NewFor (Processo nº 2018/18416-2), o qual o meu trabalho faz parte.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP), em especial ao Departamento de Ciências Florestais e o Programa de pós-graduação Recursos Florestais.

Ao Lastrop (Laboratório de Silvicultura Tropical) e todos os seus membros, em especial à Maria Andreia.

À Taísi e a Laura, “irmãs” que o mestrado me deu. E a todos os amigos da pós: Marcelo, Giulio, Natália, Anani, Isabela, Lukas.

Aos pós-doutorandos que me auxiliaram na construção, análises e escrita do trabalho Angélica, Danilo e de modo especial à Catherine que esteve disponível para sanar diversas dúvidas.

À Ana Maria Oliveira, Karen Beneton, João Vitor Fabri e demais bolsistas de Treinamento Técnico do Projeto NewFor e aos estagiários, em especial Guilherme Melman, Matheus Fuza e Marina (Lindalva) que foram muito importantes no apoio das atividades de campo.

Ao Grupo de Adequação Ambiental (GADE/ESALQ/USP) que participaram das atividades de campo, principalmente na ESALQ.

Ao Pacto pela Restauração da Mata Atlântica, em especial à Ludmila Pugliese.

## SUMÁRIO

RESUMO.....	6
ABSTRACT .....	8
1. INTRODUÇÃO .....	9
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	13
2.1. Área de estudo .....	13
2.2. Coleta de dados.....	14
2.2.1. Levantamento de indicadores em campo.....	14
2.2.2. Terrestrial Laser Scanning Mobile (TLS-Mobile) .....	15
2.2.3. Airborne Laser Scanning UAV (ALS-UAV).....	16
2.3. Análise de dados .....	17
2.4. Classificação da densidade de regenerantes de acordo com normas legais .	17
3. RESULTADOS .....	19
4. DISCUSSÃO .....	25
5. CONCLUSÃO.....	29
REFERÊNCIAS.....	31
ANEXOS.....	37

## RESUMO

### Monitoramento da regeneração de plantios de restauração florestal com tecnologia Lidar

A demanda crescente pela restauração em larga escala tem requerido metodologias de monitoramento que sejam eficientes, escalonáveis e de baixo custo. Neste contexto, diferentes abordagens de sensoriamento remoto têm sido usadas para monitorar projetos de restauração, com elevado nível de sucesso para indicadores de estrutura florestal. No entanto, o monitoramento remoto da comunidade regenerante do sub-bosque, um indicador chave para a sustentabilidade ecológica de plantios de restauração, continua sendo um importante desafio. O presente trabalho testou a utilização do sensor Lidar (*Light Detection and Ranging*) ALS-UAV (*Airborne Laser Scanning – Unmanned Aerial Vehicle*) e TLS-mobile (*Terrestrial Laser Scanning – Mobile*) para o monitoramento de plantios de restauração florestal, com destaque para a densidade de indivíduos regenerantes do sub-bosque. Em campo, monitoramos a densidade de indivíduos regenerantes (duas classes: i) entre 0.5 e 2 m; ii) com DAP < 5 cm e altura  $\geq$  2m), altura dos indivíduos com DAP  $\geq$  5 cm (onde obteve-se: máxima, média e desvio padrão), cobertura de copa, densidade e área basal de indivíduos DAP  $\geq$  5 cm, em 35 parcelas de 900 m<sup>2</sup> estabelecidas em plantios de restauração de diferentes idades (2 a 47 anos) localizados em Anhembi - SP, Piracicaba - SP e Itatinga - SP. Em seguida, coletamos dados Lidar ALS-UAV e Lidar TLS-mobile nas mesmas parcelas, sendo obtidas 17 métricas de estrutura florestal para cada Lidar. Avaliamos inicialmente a correlação entre as métricas Lidar (ALS vs. ALS, TLS vs. TLS e ALS vs. TLS) para avaliar a redundância entre elas. Em seguida, foi avaliada a correlação das métricas Lidar com os indicadores de campo. Finalmente, obtemos uma regressão da métrica que obteve maior correlação com a densidade de regenerantes e a densidade total de regenerantes na parcela, com o objetivo de obter uma equação que se prevê a densidade de regenerantes. Nossos resultados demonstraram que ambos os sensores foram eficientes para monitorar a estrutura horizontal e vertical dos plantios de restauração, observando-se correlações positivas entre os dados coletados em campo e por Lidar para indicadores de altura, área basal, cobertura de copa e densidade de indivíduos com DAP  $\geq$  5 cm. A métrica Lidar de Percentual de pontos entre 0.5 e 5 m coletada pelo sensor TLS-mobile foi a que melhor se correlacionou com as duas classes de densidade de indivíduos regenerantes. Métricas relacionadas à cobertura do Dossel (Cobertura de Copa – Lidar TLS-mobile) também apresentou correlação positiva com as duas classes de densidade de indivíduos regenerantes, indicando que a cobertura de copa pode ser um *proxy* da densidade de indivíduos regenerantes no sub-bosque. Além disso, o Percentil 25 e o Percentual de pontos entre 0.5 e 2 m, também apresentaram correlação com a densidade de regenerantes  $\geq$  2 m de altura. O Lidar ALS-UAV não apresentou correlação com a densidade de regenerantes. A regressão obtida entre o Percentual de pontos entre 0.5 e 5 m e a densidade total de regenerantes se demonstrou eficiente na estimativa da densidade de regenerantes. Os dois tipos sensores Lidar são eficientes para o monitoramento da estrutura do dossel, mas o TLS-mobile é o mais adequado para o monitoramento preciso e direto da comunidade de indivíduos regenerantes no sub-bosque de plantios de restauração florestal.

Palavras-chave: Regeneração natural, monitoramento, Terrestrial Laser Scanning – Mobile, Airborne Laser Scanning – Unmanned Aerial Vehicle, Restauração ecológica, Restauração em larga escala, Restauração de paisagens florestais, Sensoriamento remoto



## ABSTRACT

### Monitoring the regeneration of forest restoration plantations with Lidar technology

The growing demand for large-scale restoration has required monitoring methodologies that are efficient, scalable and cost-effective. In this context, different remote sensing approaches have been used to monitor restoration projects, with a high level of success for forest structure indicators. However, remote monitoring of the understory regenerating community, a key indicator for the ecological sustainability of restoration plantations, remains an important challenge. The present study tested the use of the Lidar (*Light Detection and Ranging*) ALS-UAV (*Airborne Laser Scanning – Unmanned Aerial Vehicle*) and TLS-mobile (*Terrestrial Laser Scanning – Mobile*) sensor for monitoring forest restoration plantations, with emphasis on the density of understory regenerating individuals. In the field, we monitored the density of regenerating individuals (two classes: i) between 0.5 and 2 m; ii) with DBH < 5 cm and height  $\geq$  2m), height of individuals with DBH  $\geq$  5 cm (where maximum, mean and standard deviation were obtained), canopy coverage, density and basal area of individuals DBH  $\geq$  5 cm, in 35 plots of 900 m<sup>2</sup> established in restoration plantations of different ages (2 to 47 years) located in Anhembi - SP, Piracicaba - SP and Itatinga - SP. Then, we collected Lidar ALS-UAV and Lidar TLS-mobile data in the same plots, obtaining 17 metrics of forest structure for each Lidar. We initially evaluated the correlation between the Lidar metrics (ALS vs. ALS, TLS vs. TLS and ALS vs. TLS) to assess the redundancy among them. Then, we assessed the correlation between the Lidar metrics and the field indicators. Finally, we obtained a regression model of the metric that presented the highest correlation with the density of regenerants and the total density of regenerants in the plot, to obtain an equation that predicts the density of regenerants. Our results showed that both sensors were efficient to monitor the horizontal and vertical structure of restoration plantations, observing positive correlations between data collected in the field and by Lidar sensors for indicators of height, basal area, canopy cover and density of individuals with DBH  $\geq$  5 cm. The Lidar metric of Percentage of points between 0.5 and 5 m collected by the TLS-mobile sensor was the one that best correlated with the two density classes of regenerating individuals. Metrics related to canopy cover (Cover – Lidar TLS-mobile) also showed a positive correlation with the two density classes of regenerating individuals, indicating that canopy cover can be a proxy for the density of regenerating individuals in the understory. In addition, the percentile 25 and the percentage of points between 0.5 and 2 m were also correlated with the density of regenerants  $\geq$  2 m in height. The Lidar ALS-UAV showed no correlation with the density of regenerants. The regression obtained between the percentage of points between 0.5 and 5 m and the total density of regenerants proved to be efficient in estimating the density of regenerants. Both types of Lidar sensors are efficient for monitoring the canopy structure, but the TLS-mobile is the most suitable for precise and direct monitoring of the community of regenerating individuals in the understory of forest restoration plantations.

Keywords: Natural regeneration, monitoring, Terrestrial Laser Scanning – Mobile, Airborne Laser Scanning – Unmanned Aerial Vehicle, Ecological restoration, Large-scale restoration, Restoration of forest landscapes, Remote sensing

## 1. INTRODUÇÃO

Há uma demanda crescente pela restauração ecológica de ecossistemas em larga escala, a qual pode gerar múltiplos benefícios como a mitigação da mudança climática (HOUGHTON; BYERS; NASSIKAS, 2015; ZANINI et al., 2021; GARDON; SANTOS; RODRIGUES, 2020), redução da extinção de espécies (POSSINGHAM; BODE; KLEIN, 2015; NEWMARK et al., 2017), promoção de meios de vida sustentáveis (SUNDERLIN et al., 2005) e geração de empregos (BRANCALION et al., 2022). Diversas iniciativas regionais (PACTO, 2022), nacionais (SOARES-FILHO et al., 2014; MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2017), globais (BONN CHALLENGE, 2022; INICIATIVE 20X20, 2022) e institucionais (TNC, 2022; MST, 2022), têm surgido recentemente com o objetivo de restaurar grandes áreas. Tais iniciativas compõem hoje uma ampla rede que integra a Década de Restauração de Ecossistemas da ONU (2021-2030). Entretanto, a restauração de ecossistemas é uma atividade complexa, que requer cuidados especiais em seu planejamento, implantação e monitoramento (BRANCALION; HOLL, 2020).

O monitoramento dos projetos de restauração é uma etapa chave para garantir o seu sucesso (GANN et al., 2019). Com o monitoramento é possível identificar como e quando são necessárias intervenções para restabelecer a trajetória de projetos, evitando desperdícios de tempo e recursos investidos (BRANCALION, GANDOLFI, RODRIGUES, 2015). Saber o objetivo e os resultados que se esperam do projeto é fundamental para avaliar seu desempenho (DURIGAN, 2011; BRANCALION, GANDOLFI, RODRIGUES, 2015). Além disso, comparar florestas em processo de restauração com ecossistemas de referência é importante para aferir o progresso da restauração (BRANCALION, GANDOLFI, RODRIGUES, 2015; LONDE et al., 2020).

Entretanto, a avaliação de diversos indicadores em campo pode ser demorada, onerosa e requerer técnicos qualificados, dificultando a sua utilização em larga escala (BRANCALION et al., 2012; ZAHAWI et al., 2015; ALMEIDA et al., 2020). Adicionalmente, o monitoramento tradicionalmente realizado em campo normalmente demanda grande número de amostras para atingir a suficiência amostral em áreas extensas e heterogênea (VIANI et al., 2018; ALMEIDA et al., 2020). Com isso, abordagens alternativas para avaliar e monitorar diferentes parâmetros de restauração florestal podem se valer de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento, com potencial de reduzir a necessidade de mensuração em campo, principalmente para projetos de restauração em larga escala e para áreas de difícil acesso (MASCARO et al., 2014; ZAHAWI et al., 2015; ALMEIDA et al., 2020).

Diversos estudos têm demonstrado a potencialidade do sensoriamento remoto no monitoramento da restauração, estabelecendo bases metodológicas para que outros estudos possam diversificar as abordagens utilizadas (ZAHAWI et al., 2015; ALMEIDA et al., 2019ab; ALMEIDA et al., 2020; ALMEIDA et al., 2021; ALBUQUERQUE et al., 2021; ALBUQUERQUE et al., 2022). Merece atenção o uso crescente do sensor Lidar (*Light Detection and Ranging*), um sistema que emite dezenas de milhares de pulsos laser por segundo no espectro do infravermelho próximo, que permite construir, pelo tempo de retorno, um modelo tridimensional da estrutura florestal (ALMEIDA et al., 2020). Há uma grande variedade de métricas geradas pelo sensor Lidar que permitem a avaliação de

diferentes aspectos estruturais da floresta (GORGENS; SILVA; RODRIGUEZ, 2014; BAKX et al., 2019; VALBUENA et al., 2020). Hoje em dia, há inúmeros modelos de Lidar que podem ser utilizados para mensurações florestais como equipamentos de base fixa – *Terrestrial Laser Scanning* (DASSOT; CONSTANT; FOURNIER, 2011; DE CONTO et al., 2017), incluindo também equipamentos aerotransportados - *Airborne Laser Scanning* (ALMEIDA et al., 2019b; 2021) e até mesmo acoplados a satélites como *Geoscience Laser Altimeter System* (GLAS) e o *Global Ecosystem Dynamics Investigation* (GEDI). Há ainda modelos moveis que podem ser utilizados manualmente, combinados com uma mochila, ou até mesmo transportados por um drone, como o ZEB HORIZONTAL (GEOSLAM, 2022). A tecnologia tem se aprimorando ao ponto de já poder ser integrada a smartphones para a função de mensuração da dimensão de objetos (APPLE, 2022) e até mesmo a carros autônomos (LI et al., 2017). No entanto, ainda é necessário que metodologias sejam testadas para que novos avanços tecnológicos possam ser utilizados no monitoramento da restauração, principalmente nos casos em que a restauração é uma atividade compulsória e monitorada por meio de protocolos oficiais.

O Lidar tem se demonstrado promissor para o monitoramento de projetos de restauração principalmente para indicadores estruturais como biomassa, cobertura de copa e complexidade estrutural (ALMEIDA et al. 2019ab; ALMEIDA et al. 2021), os quais possuem relação com as árvores de maior porte que compõem o dossel. Entretanto, pouco se sabe sobre a capacidade da tecnologia lidar em monitorar a regeneração natural no sub-bosque, o que é dificultado pelo menor porte dos indivíduos.

A comunidade regenerante de plantios de restauração é formada por indivíduos de menor porte que se estabelecem de forma espontânea, sem serem plantados, por meio das sementes dispersas tanto pelas árvores plantadas no local como aquelas presentes do entorno do plantio (BERTACCHI et al., 2016). A densidade e diversidade da comunidade regenerante é muito variável no tempo e no espaço, sendo influenciada por diversos fatores que governam a dispersão de sementes (e.g. disponibilidade de fontes de sementes e dispersores) e do estabelecimento e crescimento de plântulas (e.g. viabilidade de sementes, predação, qualidade do micro-sítio (SUGANUMA; DURIGAN, 2015). Ao mesmo tempo, estes indicadores são cruciais para o monitoramento da restauração florestal, principalmente de plantios, uma vez que permitem compreender a capacidade de auto-perpetuação da floresta (CHAVES et al., 2015). A densidade de regenerantes possui relação com outros indicadores que podem ser utilizados no monitoramento de projetos de restauração, como densidade de regenerantes de espécies não pioneiras, riqueza de regenerantes e cobertura do dossel (MASSI; CHAVES; TAMBOSI, 2022). Diversos protocolos de monitoramento da restauração em campo têm incluído a densidade e riqueza da comunidade regenerante (PACTO, 2013; SÃO PAULO, 2014; INEA, 2019), de forma que seu monitoramento se torna importante não apenas para o manejo adaptativo, mas também para atender a demandas legais.

O monitoramento da riqueza da comunidade regenerante é um enorme desafio em campo, dada a dificuldade de se identificar plântulas, o que torna praticamente impossível de ser realizado por sensoriamento remoto. No entanto, a densidade de regenerantes poderia potencialmente ser

monitorada com eficiência pelo Lidar TLS, por ser um sistema *bottom-up* que gera uma densa nuvem de dados no nível do sub-bosque florestal (LARUE et al., 2020). Como a densidade de regenerantes pode ter relação com outros indicadores, como a própria riqueza de regenerantes (MASSI; CHAVES; TAMBOSI, 2022), desenvolver metodologias para seu adequado monitoramento pode trazer grande contribuição para projetos de restauração florestal.

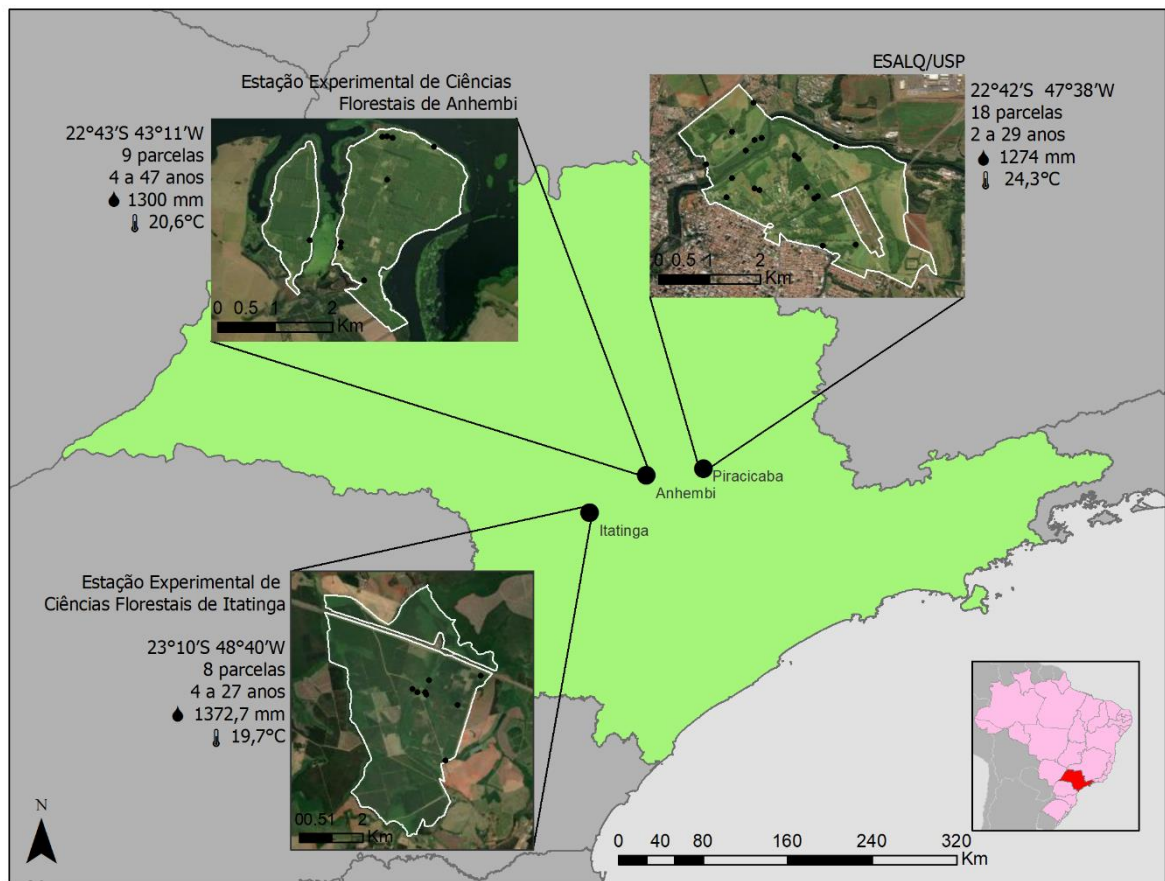
Com isso, o presente estudo tem como objetivo avaliar a viabilidade técnica de monitorar plantios de restauração florestal, com destaque para a densidade de indivíduos regenerantes do sub-bosque, por meio do Lidar TLS-mobile e Lidar ALS-UAV. Para tanto, avaliamos 35 parcelas de restauração com levantamento de campo, Lidar TLS-mobile e Lidar ALS-UAV. Os dados obtidos em campo foram correlacionados com métricas Lidar a fim de identificar as métricas com potencial para posterior utilização no monitoramento de projetos de restauração. Buscamos validar a utilização do Lidar para o monitoramento de indicadores comumente mensurados em campo e explorar o potencial do Lidar TLS-mobile para monitorar a densidade de indivíduos regenerantes.



## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Área de estudo

O estudo foi realizado plantios de restauração florestal com diferentes idades (2 a 47 anos), estabelecidos por métodos similares de implantação (cerca de 50 espécies arbóreas nativas, ~1700-2000 mudas plantadas por hectare e manejo da mato-competição nos primeiros três anos de plantio) e em três locais distintos: Campus da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ/USP junto com a Fazenda Areão em Piracicaba-SP; Estação Experimental de Ciências Florestais – Itatinga-SP (EECFI); Estação Experimental de Ciências Florestais – Anhembi-SP (EECFA) em florestas Estacionais Semidecíduais da Mata Atlântica (Figura 1).



**Figura 1.** Áreas de estudo. Pontos pretos dentro de cada área indicam a localização das parcelas amostrais. (Legenda ●: Precipitação média anual; ⌄ : Temperatura média anual).

## 2.2. Coleta de dados

### 2.2.1. Levantamento de indicadores em campo

Ao todo foram alocadas 35 parcelas nos três locais (Figura 1). As parcelas possuem área fixa de 900 m<sup>2</sup> com dimensões de 30 x 30 metros ou 20 x 45 metros, de acordo com o tamanho e formato dos plantios de restauração florestal, em sua maioria próximas a curso d'água em áreas de Preservação Permanente previsto pela Lei de Proteção da Vegetação Nativa (Lei 12.651/2012). As coletas aconteceram entre julho de 2019 e janeiro de 2020. Foram coletados os seguintes indicadores:

- Indivíduos arbóreos/arbustivos com DAP (Diâmetro a Altura do Peito)  $\geq 5$  cm: contagem, mensuração do DAP (em cm) e altura (em m);
- Indivíduos arbóreos/arbustivos com DAP  $< 5$  cm e altura  $\geq 2$ m: contagem;
- Indivíduos arbóreo/arbustivos entre 0.5 m e 2 m de altura: contagem em subparcela de 100m<sup>2</sup>.

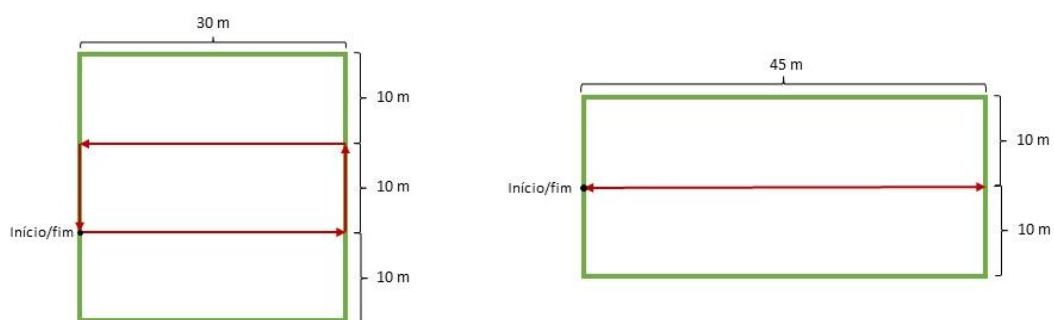
Além disso, mensuramos a Cobertura do solo com espécies nativas seguindo o Protocolo de Monitoramento de Projetos de Restauração Ecológica estabelecido pela portaria CBRN 01/2015 previsto pela Resolução SMA 32 de 03/04/2014.

- Cobertura do solo com espécies nativas: foi projetada a copa dos indivíduos nativos em uma linha de 25 metros, sendo calculada a porcentagem (%) de cobertura de solo da parcela.

Posteriormente, foram calculadas a média e desvio padrão da altura e área basal dos indivíduos com DAP  $\geq 5$ cm utilizando o Software R (R CORE TEAM, 2022). Com isso, os indicadores coletados em campo são: a) Densidade de indivíduos regenerantes arbóreo/arbustivos (2 classes: i) entre 0.5 e 2 m; ii) com DAP  $< 5$  cm e altura  $\geq 2$ m); b) Altura máxima dos indivíduos arbóreo/arbustivos com DAP  $\geq 5$  cm; c) Altura média dos indivíduos dos indivíduos arbóreo/arbustivos com DAP  $\geq 5$  cm; d) Desvio Padrão das alturas dos indivíduos arbóreo/arbustivos com DAP  $\geq 5$  cm; e) Densidade de indivíduos arbóreo/arbustivos com DAP  $\geq 5$  cm; f) Área basal da parcela; g) Cobertura de solo. A seleção destes indicadores que descrevem a estrutura se deu com base em protocolos de monitoramento de projetos de restauração do Pacto pela Restauração da Mata Atlântica (PACTO, 2013), Resolução SMA 32/2014 e Portaria CBRN 01/2015 (SÃO PAULO, 2014; SÃO PAULO, 2015) e o Manual de Procedimentos para o Monitoramento e avaliação de áreas em restauração florestal no Estado do Rio de Janeiro (INEA, 2019), para mais detalhes sobre os indicadores estruturais apresentados pelos protocolos, consultar o Anexo A. Duas parcelas apresentaram alta densidade monoespecífico nas duas classes de regenerantes, por não condizer com a realidade das demais parcelas, elas foram retiradas para as análises que envolviam densidade de regenerantes.

## 2.2.2. Terrestrial Laser Scanning Mobile (TLS-Mobile)

Foi utilizado o modelo Lidar ZEB HORIZON da GeoSLAM, com 16 sensores que emitem 300.000 pulsos laser por segundo, atingindo um raio de até 100 m e acurácia de até 6 mm (GEOSLAM, 2022). Foi realizado um caminhamento dentro de cada parcela respeitando o seu formato e as especificações do equipamento que precisa iniciar e terminar o levantamento no mesmo ponto (Figura 2). Essas coletas foram realizadas no período de 24 a 27 de setembro de 2019. Sendo obtidas nuvens Lidar com densidade média de 13,900 pontos/m<sup>2</sup> (Figura 3B). No presente trabalho este sistema será chamado de Lidar TLS-mobile (*Terrestrial Laser Scanning*).



**Figura 2.** Caminhamento feito nas parcelas para a obtenção dos dados Lidar TLS mobile.

As nuvens de ponto de cada uma das 35 parcelas foram pré-processadas pelo Software Lastools com as ferramentas: *Lastile*, *Lasnoise*, *Lasground* e *Lasmerge*. Com o *Lastile*, foi possível dividir a nuvem em pequenas frações de 10x10 m com *buffer* de 2m para facilitar o processamento das demais etapas e selecionar os tiles pertencentes a parcela. Já o *Lasnoise* foi utilizado para remover os ruídos, sendo considerados ruídos o agrupamento de até 20 pontos isolados. Esse valor aparentemente elevado de pontos foi escolhido devido à alta densidade de pontos da nuvem. Com o *Lasground* foi possível classificar os pontos de solo e normalizar a nuvem. Por fim, foi utilizado o *Lasmerge* que permitiu a junção dos tiles, desconsiderando o *buffer* de 2 m inicial.

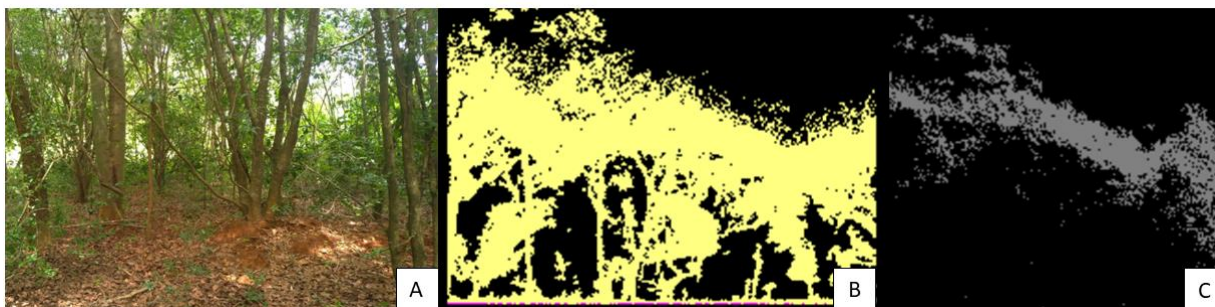
Em posse da nuvem de pontos pré-processada foram obtidas as métricas Lidar em ambiente R através dos pacotes: *ForestGapR*, *lidR* e *raster*. Com a função *stdmetrics* do pacote *lidR* obtivemos as métricas de cada nuvem: altura máxima; altura média; desvio padrão da altura (rugosidade); assimetria da altura; curtose da altura; percentual de retornos acima da altura média; percentual de retornos acima de 2 metros de altura; percentis 25, 50, 75, 95 da altura. Ainda foi extraído o percentual de retornos entre as alturas: 0.5 – 2m; 2 – 5m; 0.5 e 5m. Em seguida, geramos um mapa de altura do dossel com resolução de 1 m para cada parcela, considerando o ponto mais alto em cada pixel usando a função *grid\_canopy*, onde foram obtidas as métricas de média e desvio padrão do mapa de altura do dossel. Por fim, usando a função *getForestGaps* obtivemos a abertura de dossel que permitiu calcular a cobertura de copa, consideramos clareiras as áreas em que a altura do dossel era inferior a 5 m e tamanho mínimo de 1 m<sup>2</sup>.



### 2.2.3. Airborne Laser Scanning UAV (ALS-UAV)

O sistema utilizado para a obtenção de dados ALS-UAV foi o GatorEye que possui: a) um sensor Lidar com retorno duplo Ultra Puck Velodyne VLP-32c com 600.000 retornos por segundo; b) um sensor GNSS (*Global Navigation Satellite System*) com precisão de  $\pm 2,5$  cm usando um receptor de frequência duplo L1/L2; c) uma unidade de medição inercial STIM 300 de grau tático. Esse sistema foi acoplado em um drone da marca DJI Matrice 600 Pro com 6 hélices, capacidade de voo de 16-22 minutos com cinco conjuntos de baterias para voos múltiplos por dia, e 5 km de telemetria (BROADBENT et. al., 2022). Os dados georreferenciados foram pós-processados em relação a uma estação de base local (X900S-OPUS), usando o software Novatel Inertial Explorer. A coleta de dados foi realizada a uma altura de voo de 60 m acima do solo, com velocidade de 10 m/s e a uma distância horizontal aproximada entre as linhas de voo adjacentes de 50 m, produzindo, assim, uma densidade de nuvem de pontos superior a 100 retornos por metro quadrado, conforma apontado por Sorrini (2021). As áreas de estudo foram sobrevoadas em agosto de 2019. Das 35 parcelas de campo, 7 não foram sobrevoadas por estarem próximas ao Aeroporto de Piracicaba-SP. Sendo obtidas nuvens Lidar com densidade média de 150 pontos/m<sup>2</sup> (Figura 3C). No presente trabalho este sistema será chamado de Lidar ALS-UAV (*Airborne Laser Scanning*).

Os sobrevoos das três áreas de estudo foram pré-processados conforme o proposto por Almeida e colaboradores (2019b), no ambiente R utilizando os pacotes ForestGapR, lidR e raster. Após a normalização das nuvens de pontos, foram obtidas as seguintes métricas: altura máxima; altura média; desvio padrão da altura (rugosidade); assimetria da altura; curtose da altura; percentual de retornos acima da altura média; percentual de retornos acima de 2 metros de altura; percentis 25, 50, 75, 95 da altura com a função *stdmetrics* do pacote lidR. Ainda foi extraído o percentual de retornos entre as alturas: 0.5 – 2m; 2 – 5m; 0.5 e 5m. Posteriormente, foi gerado um mapa de altura do dossel com resolução de 0.5 m para cada área sobrevoada, considerando o ponto mais alto em cada pixel usando a função *grid\_canopy*. Com base na altura do dossel para cada pixel de 0.5 m em cada parcela, calculamos a média e desvio padrão para a altura do dossel em cada parcela amostral. Para obtenção da Abertura do dossel foi utilizado a função *getForestGaps*. Consideramos clareiras as áreas em que a altura do dossel era inferior a 5 m e tamanho mínimo de 10 m<sup>2</sup>. Duas parcelas com 2 anos de idade apresentaram métricas discrepantes das demais por ainda não ter desenvolvido uma estrutura que fosse detectadas pelo Lidar ALS-UAV, por isso foram retiradas das análises, com isso, foram utilizadas 28 parcelas para as análises com o Lidar ALS-UAV.



**Figura 3.** Plantio de restauração florestal com 14 anos em Piracicaba-SP. A) In loco; B) Transecto da nuvem Lidar TLS-mobile com densidade de 13,900 pontos/m<sup>2</sup>; C) Transecto da nuvem Lidar ALS-UAV com densidade de 150 pontos/m<sup>2</sup>.

### 2.3. Análise de dados

As análises para identificar as melhores métricas que descrevem os indicadores em campo foram realizadas em ambiente R com auxílio do pacote Hmisc, o qual permite realizar correlações de Pearson e Spearman, obtendo-se os valores de  $r$  e  $p$ -value. Com a finalidade de reduzir o número de métricas a serem correlacionadas com os indicadores de campo, fizemos as correlações preliminares:

- i) Correlação de Pearson entre métricas do Lidar TLS-mobile (Figura 4) e Lidar ALS-UAV (Figura 5);
- ii) Correlação de Pearson entre métricas pareadas (ex. Altura máxima TLS-mobile vs. Altura máxima ALS-UAV, ANEXO B). Foram consideradas métricas altamente correlacionadas as que apresentam  $r \geq 0.9$ . Ainda para auxiliar na seleção das métricas, correlacionamos as métricas com os indicadores de campo, onde identificamos que as métricas que potencialmente seriam excluídas apresentavam correlação com os indicadores, com isso, todas as 17 métricas foram mantidas. Finalmente, foram correlacionados os indicadores de campo com cada métrica Lidar (TLS-mobile e ALS-UAV), para identificar qual(is) métricas melhor representam os indicadores de campo (ANEXO C). Nesta etapa, fizemos correlações de Pearson e Spearman sendo consideradas as com maior  $r$  e  $p$ -value  $< 0.01$ . Foram feitos gráficos para as correlações mais significativas.

### 2.4. Classificação da densidade de regenerantes de acordo com normas legais

Para obtermos a densidade total de regenerantes da parcela. Somamos a Densidade de Regenerantes entre 0.5 e 2 m de altura com a Densidade de Regenerantes com altura  $\geq 2$ m e DAP  $< 5$ cm. Em seguida foi obtida a densidade total para 1 hectare, obtido através de extrapolação. O somatório da densidade de regenerantes de cada parcela foi classificado de acordo com a SMA 32/2014 (São Paulo, 2014), que divide em três níveis de adequação: Crítico, Mínimo e Adequado, de acordo com a idade do plantio: 3, 5, 10, 15 e 20 anos (para mais informações consultar o ANEXO D). Em posse da métrica que apresentou correlações positivas significativas com as duas classes de regenerante (Percentual de pontos entre 0.5 e 5 metros) estabelecemos a regressão linear que

função do somatório de regenerantes de cada parcela (o histograma de dispersão dos resíduos pode ser consultado no ANEXO E). A partir da equação obtida, calculamos a densidade de regenerantes e reclassificamos utilizando os níveis da SMA 32/2014 a fim de verificar se o mesmo nível encontrado em campo era obtido pela regressão. Para esta etapa, não foram consideradas quatro parcelas: duas parcelas que apresentavam alta densidade de regenerantes, diferente à realidade de campo e outras duas parcelas com idade inferior a 3 anos, pois estes plantios ainda estavam se estabelecendo em campo e não apresentavam regenerantes.

### 3. RESULTADOS

As métricas do Lidar TLS-mobile apresentaram alta correlação entre si. Das 17 métricas, 10 apresentaram correlação Pearson acima de 0.9 com uma ou mais métricas (Figura 4). Destacaram-se as correlações entre Rugosidade (m) e Percentil 95 (m) ( $r=0.985$ ), Percentual acima de 2 m de altura (%) e Percentil 50 (m) ( $r=0.985$ ), Altura máxima (m) e CHM médio (m) ( $r=0.949$ ). A métrica Lidar TLS-mobile Altura Média (m) apresentou redundância com quatro outras métricas. O mesmo pode ser observado nas métricas do Lidar ALS-UAV, onde 8 das 17 métricas possuem correlação de Pearson acima de 0.9 com uma ou mais métricas (Figura 5). Sendo as métricas mais correlacionadas Percentil 50 (m) e Altura média (m) ( $r=0.988$ ), Percentil 75 (m) e Percentil 50 (m) ( $r=0.977$ ), Percentual entre 0.5 e 5 m (%) e Percentual entre 2 e 5 m (%) ( $r=0.978$ ). A métrica do Lidar ALS-UAV Altura média apresentou alta correlação positiva Pearson ( $r>0.9$ ) com 5 outras métricas do Lidar ALS-UAV. Quando observadas as métricas pareadas, apenas o CHM médio (m) apresentou alta correlação ( $r=0.9405$  e  $p\text{-value} < 0.0001$ ), entretanto outras métricas possuem correlação significativa, mas com  $r$  inferior a 0.9 (ANEXO B).

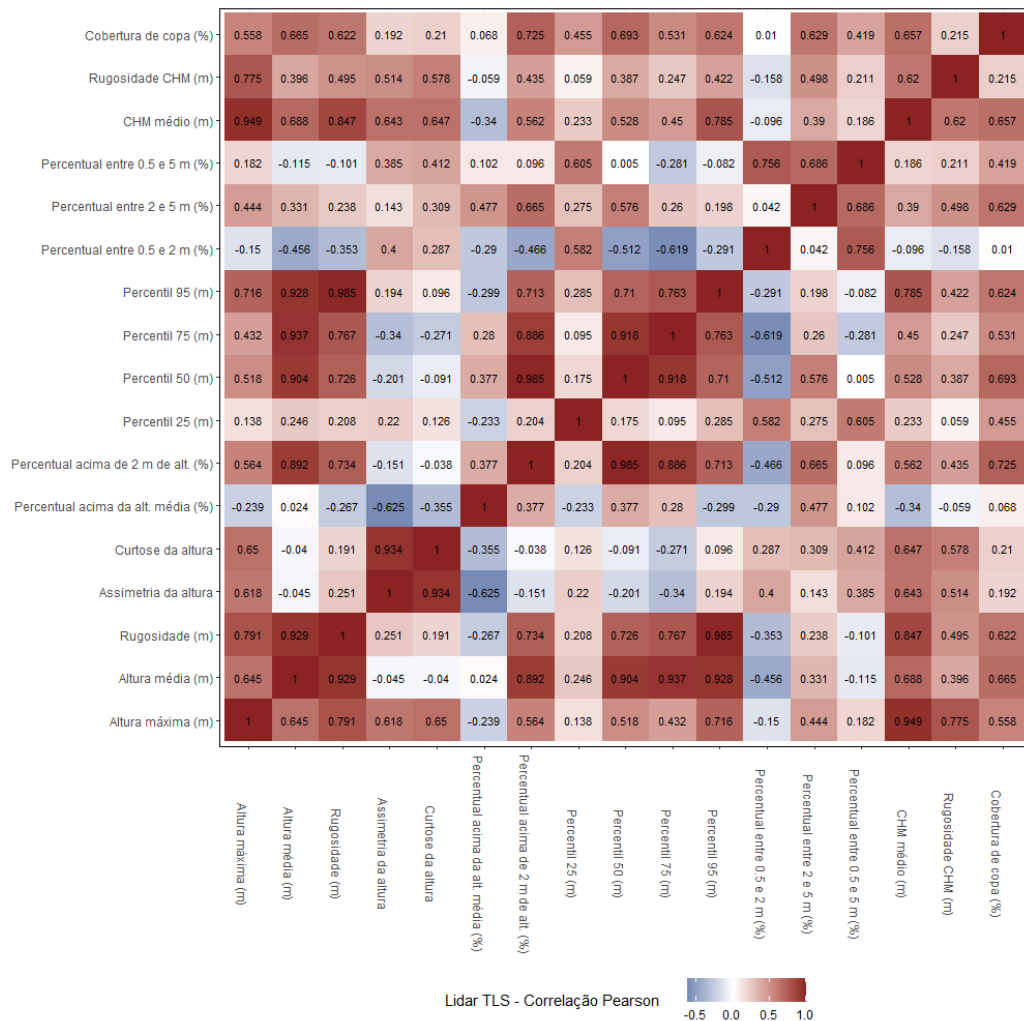
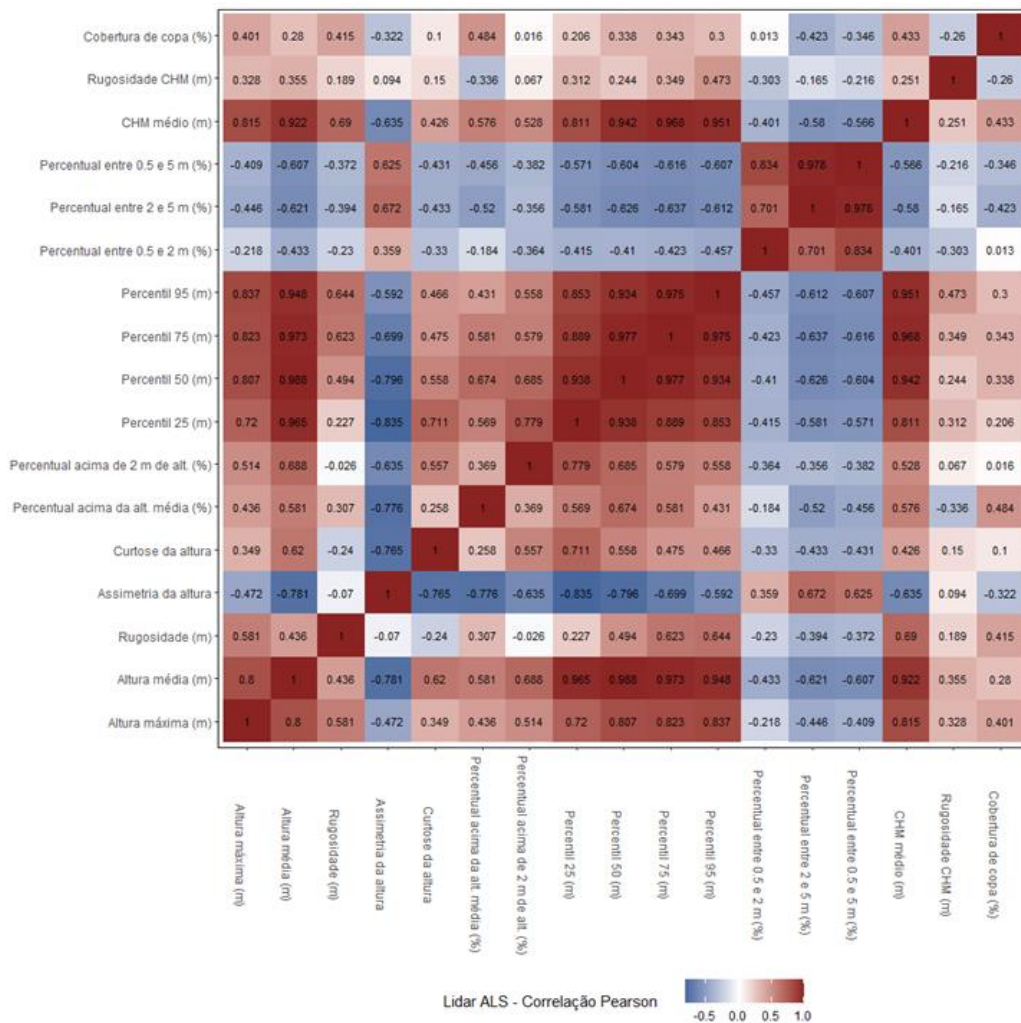


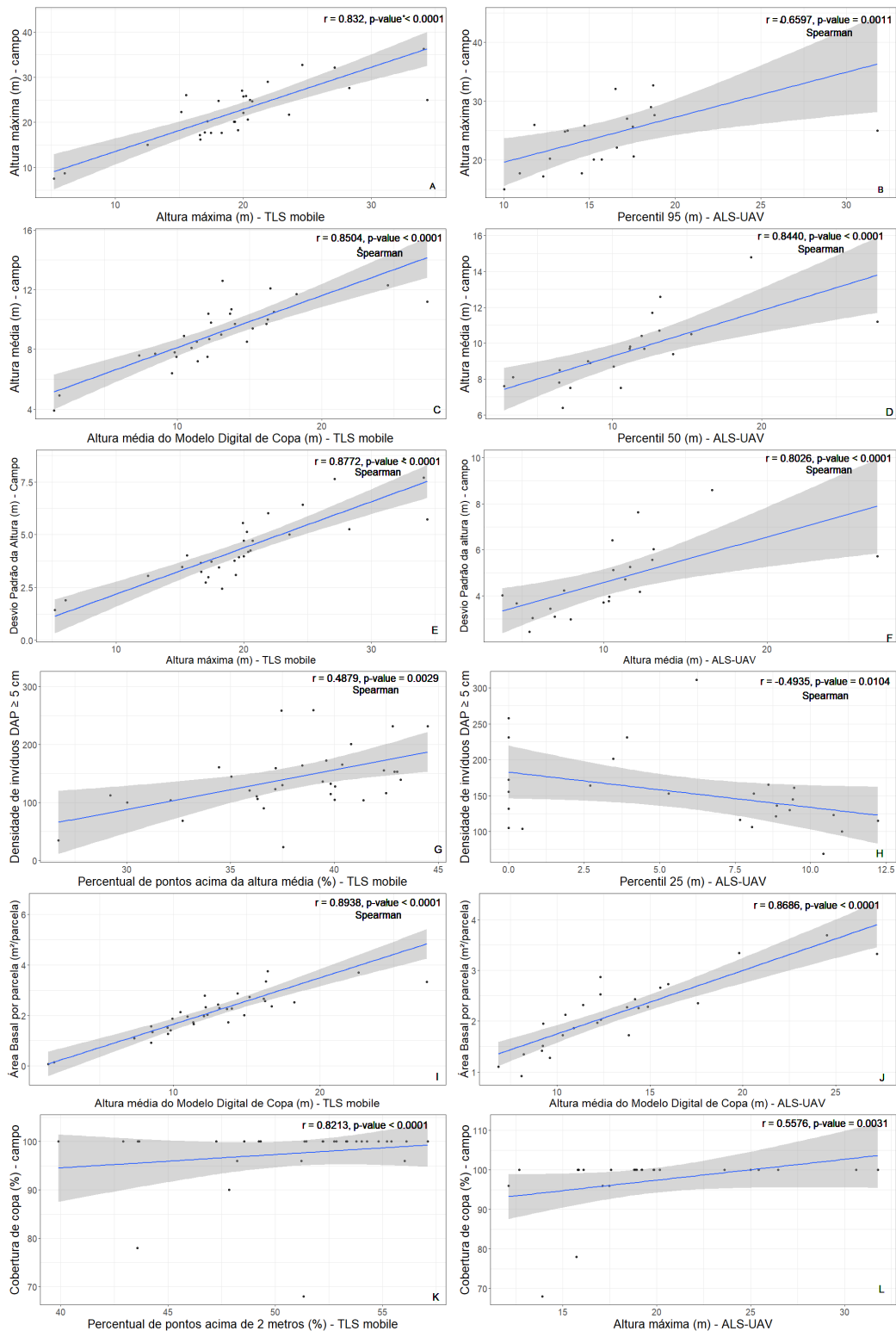
Figura 4. Correlações de Pearson entre as 17 métricas Lidar TLS mobile. Cores quentes indicam valores de  $r$  positivo e cores frias,  $r$  negativo.



**Figura 5.** Correlações de Pearson entre as 17 métricas Lidar ALS-UAV. Cores quentes indicam valores de  $r$  positivo e cores frias,  $r$  negativo.

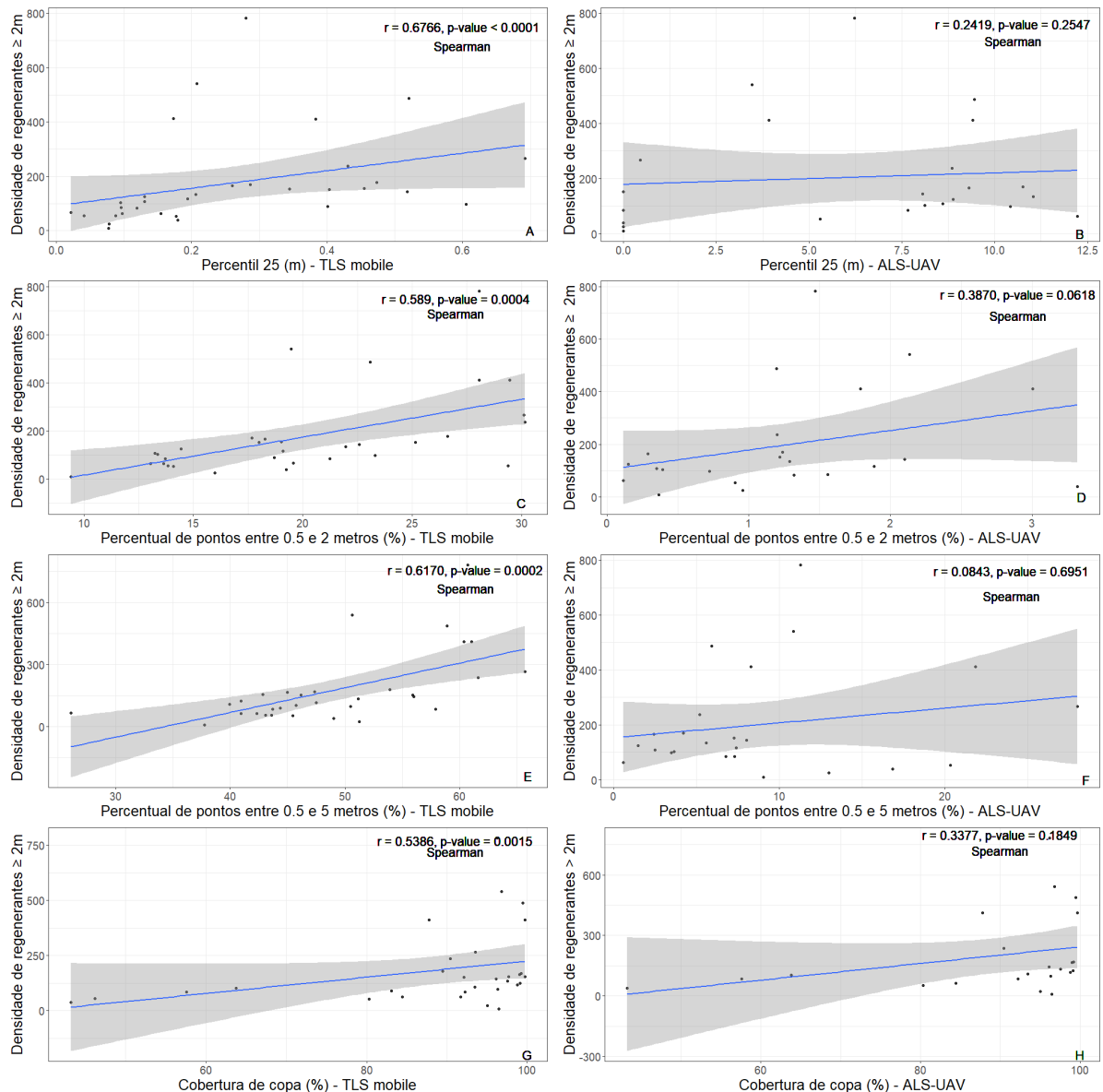
Ao observar as correlações entre os indicadores de campo e as métricas Lidar (ALS-UAV e TLS-mobile), nota-se que para o indicador Altura Máxima da parcela a métrica do Lidar TLS-mobile que mais se correlacionou foi a altura máxima dos indivíduos arbóreo/arbustivos com  $DAP \geq 5$  cm ( $r=0.832$ ,  $p\text{-value}<0.0001$ , Pearson, Figura 6A), entretanto a melhor métrica do ALS-UAV foi o Percentil 95 ( $r=0.6597$ ,  $p\text{-value}=0.0011$ , Spearman, Figura 6B). Para a Altura média dos indivíduos arbóreo/arbustivos com  $DAP \geq 5$  cm, o Lidar TLS-mobile obteve maior correlação com a Altura média do Modelo Digital de Copa ( $r=0.8504$ ,  $p\text{-value}<0.0001$ , Spearman, Figura 6C), e o ALS-UAV com o Percentil 50 ( $r=0.8440$ ,  $p\text{-value}<0.0001$ , Spearman, Figura 6D). O Desvio Padrão das alturas dos indivíduos arbóreo/arbustivos com  $DAP \geq 5$  cm, obteve maior correlação com a Altura Máxima do Lidar TLS-mobile ( $r=0.8772$ ,  $p\text{-value}<0.0001$ , Spearman, Figura 6E), já a Altura média do ALS-UAV apresentou maior correlação ( $r=0.8026$ ,  $p\text{-value}<0.0001$ , Spearman, Figura 6F). Densidade de indivíduos arbóreo/arbustivos com  $DAP \geq 5$  cm mostrou maior correlação com o Percentual de pontos acima da altura média do Lidar TLS-mobile ( $r=0.4879$ ,  $p\text{-value}=0.0029$ , Spearman, Figura 6G), já com o Lidar ALS-UAV foi o Percentil 25 ( $r=-0.4935$ ,  $p\text{-value}=0.0104$ , Spearman, Figura 6H). A Área basal

melhor se correlacionou com a Altura Média do Modelo Digital de Copa tanto com o TLS-mobile ( $r=0.8938$ ,  $p\text{-value}<0.0001$ , Spearman, Figura 6I) quanto para o ALS-UAV ( $r=0.8619$ ,  $p\text{-value}<0.0001$ , Spearman, Figura 6J). Por fim, a Cobertura de copa apresentou maior correlação Percentual de pontos acima de 2 metros de altura do Lidar TLS-mobile ( $r=0.8213$ ,  $p\text{-value}<0.0001$ , Pearson, Figura 6K), enquanto o Altura máxima do ALS-UAV foi o que melhor se correlacionou ( $r=0.5578$ ,  $p\text{-value}=0.0030$ , Pearson, Figura 6L). As demais correlações realizadas entre os indicadores de campo e as métricas dos sensores Lidar podem ser observadas no ANEXO C.



**Figura 6.** Métricas Lidar relacionadas com indicadores de campo. A linha azul é a linha de tendência e a área cinza é o IC=95%. A) Altura máxima (m) – TLS mobile e Altura máxima (m) – campo; B) Percentil 95 (m) – ALS-UAV e Altura máxima (m) – campo; C) Altura média (m) – TLS mobile e Altura média (m) – campo; D) Percentil 50 (m) – ALS-UAV e Altura média (m) – campo; E) Altura máxima (m) – TLS mobile e Desvio Padrão da Altura (m) – campo; F) Altura média (m) – ALS-UAV e Desvio Padrão da Altura (m) – campo; G) Percentual de pontos acima da altura média (%) – TLS mobile e Densidade de indivíduos DAP  $\geq 5$  cm; H) Percentil 50 (m) - ALS-UAV e Densidade de indivíduos DAP  $\geq 5$  cm; I) Altura média do Modelo Digital de Copa (m) – TLS mobile e Área Basal por parcela ( $m^2$ /parcela); J) Altura média do Modelo Digital de Copa (m) – ALS-UAV e Área Basal por parcela ( $m^2$ /parcela); K) Percentual de pontos acima de 2 metros (%) – TLS mobile e Cobertura de copa (%) – campo; L) Altura máxima (m) – ALS-UAV e Cobertura de copa (%) – campo.

A Densidade de indivíduos regenerantes arbóreo/arbustivos com DAP < 5 cm e altura  $\geq 2$  m apresentou correlação com 4 métricas do Lidar TLS-mobile: Percentil 25 da altura ( $r=0.6766$ ,  $p\text{-value}<0.0001$ , Spearman, Figura 7A), Percentual de pontos entre 0.5 e 2 metros ( $r=0.5890$ ,  $p\text{-value}=0.0004$ , Spearman, Figura 7C), Percentual de pontos entre 0.5 e 5 metros ( $r=0.6170$ ,  $p\text{-value}=0.0002$ , Spearman, Figura 7E) e Cobertura de Copa ( $r=0.5386$ ,  $p\text{-value}=0.0015$ , Spearman, Figura 7G). As métricas obtidas do Lidar ALS-UAV não apresentaram nenhuma correlação com este indicador de campo (Figura 7B, D, F, H).

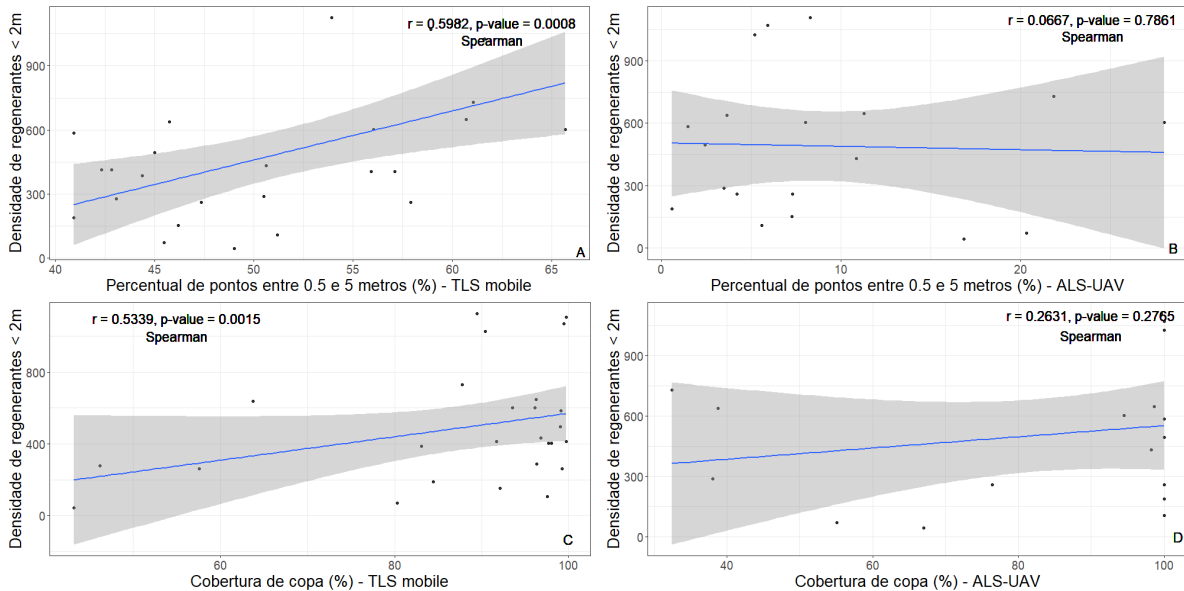


**Figura 7.** Correlação entre Densidade de Regenerantes maiores de 2m de altura com até 5 cm de DAP e Métricas Lidar (ALS-UAV e TLS -mobile). A linha azul é a linha de tendência e a área cinza é o IC=95%. A) Percentil 25 (m) - TLS mobile; B) Percentil 25 (m) - ALS-UAV; C) Percentual de pontos entre 0.5 e 2 metros de altura (%) - TLS mobile; D) Percentual de pontos entre 0.5 e 2 metros de altura - ALS-UAV; E) Percentual de pontos entre 0.5 e 5 metros de altura (%) - TLS mobile; F) Percentual de pontos entre 0.5 e 5 metros de altura - ALS-UAV; G) Cobertura de copa (%) – TLS mobile; H) Cobertura de copa (%) – ALS-UAV.

Para o indicador Densidade de Regenerantes entre 0.5 e 2 m de altura apresentou correlação com duas métricas do Lidar TLS-mobile: Percentual de pontos entre 0.5 e 5 metros



( $r=0.5982$ ,  $p\text{-value}=0.0008$ , Spearman, Figura 8A) e Cobertura de Copa ( $r=0.5386$ ,  $p\text{-value}=0.0015$ , Spearman, Figura 8C). As métricas obtidas do Lidar ALS-UAV também não apresentaram nenhuma correlação com este indicador de campo (Figura 8B, D).

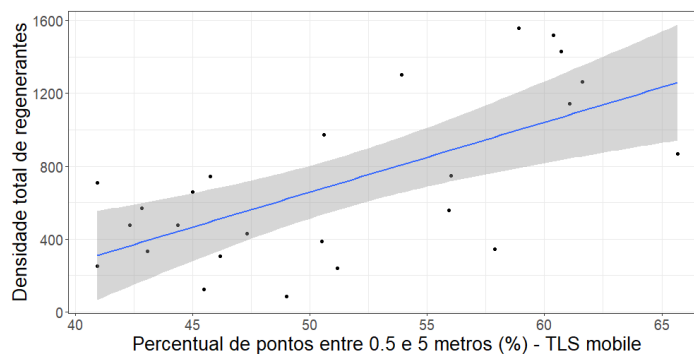


**Figura 8.** Correlação entre Densidade de Regenerantes menores de 2m de altura e Métricas Lidar (ALS-UAV e TLS -mobile). A linha azul é a linha de tendência e a área cinza é o IC=95%. A) Percentual de pontos entre 0.5 e 5 metros de altura (%) - TLS mobile; B) Percentual de pontos entre 0.5 e 5 metros de altura - ALS-UAV; C) Cobertura de copa (%) – TLS mobile; D) Cobertura de copa (%) – ALS-UAV.

A regressão linear obtida entre Densidade total de regenerantes e Percentual de pontos entre 0.5 e 5 metros de altura (%) – TLS Mobile (Equação 1) apresentou  $r^2=0.4212$  e  $p\text{-value} = 0.0004$  (Figura 9). A estimativa da densidade de regenerantes obtida por meio das equações derivadas do uso da densidade de pontos obtida pelo sensor Lidar TLS mobile resultou numa classificação precisa da classe de densidade de regeneração estabelecida pela legislação, exceto para uma parcela.

$$\text{Densidade de Regenerante} = -1259 + 38.35x$$

Onde:  $x$  = Percentual de pontos entre 0.5 e 5 metros de altura (%) – TLS Mobile



**Figura 9.** Regressão linear entre Densidade Total de Regenerantes e Percentual de pontos entre 0.5 e 5 metros de altura. Linha azul é a regressão linear (Densidade de Regenerante =  $-1259 + 38.35x$ ,  $r^2=0.4212$  e  $p\text{-value} = 0.0004$ ) e a área cinza é o IC=95%.

## 4. DISCUSSÃO

Nossos resultados demonstraram que tanto o Lidar TLS mobile quanto o ALS-UAV são potenciais ferramentas para o monitoramento da restauração. As métricas Lidar TLS-mobile se correlacionaram, ao menos uma vez, com cada um dos 8 indicadores de campo avaliados, inclusive com a densidade de regenerantes, indicador importante presente em diversos protocolos de monitoramento de campo (PACTO, 2013; SÃO PAULO, 2014; INEA, 2019). Apenas o sistema TLS mobile gerou métricas correlacionadas significativamente com a densidade de regenerantes  $\geq 2$  m (quatro métricas) ou que tivessem relação direta com a densidade de regenerantes entre 0.5 e 2 m de altura (i.e. densidade de pontos na faixa de altura de ocorrência da regeneração). O Lidar TLS mobile também apresentou correlação significativa entre a cobertura de copa e a densidade de regenerantes das duas classes, indicando que tal indicador pode servir como proxy (i.e., avaliação indireta) da densidade de regenerantes. Além disso, os dois sistemas apresentaram correlação com os indicadores de estrutura de dossel (cobertura de dossel, altura (máxima, média e desvio padrão), área basal e densidade de indivíduos arbóreos/arbustivos com DAP  $\geq 5$  cm).

O Lidar TLS mobile, por ser um sistema *bottom-up* com alta densidade de pontos, permite o melhor detalhamento da estrutura florestal, incluindo a densidade de regenerantes (LARUE et al., 2020; DONAGER; SÁNCHEZ MEADOR; BLACKBURN, 2021). Diante disto, encontramos duas métricas que se correlacionaram com a densidade de regenerantes  $< 2$  m de altura (Percentual de pontos entre 0.5 e 5 metros e Cobertura de Copa como proxy), sendo que uma está relacionada com baixas alturas, deixando evidente sua relação direta com a densidade de regenerante. Já para os regenerantes acima de 2 metros de altura, foram 4 métricas: Percentil 25 da altura, Percentual de pontos entre 0.5 e 2 metros, Percentual de pontos entre 0.5 e 5 metros e Cobertura de Copa como proxy. Avaliar a densidade de regenerantes é muito importante para acompanhar desenvolvimento de projetos de restauração, por ser considerado um indicador que demonstra que o projeto atingiu sustentabilidade garantindo sua perpetuação (CHAVES et al., 2015). Este indicador ainda está correlacionado com outros como densidade de regenerantes não pioneiro, riqueza de regenerantes e cobertura de solo (MASSI; CHAVES; TAMBOSI, 2022).

O Lidar TLS mobile ainda apresenta vantagens no monitoramento da estrutura florestal em relação ao Lidar TLS de base fixa, pois a contínua obtenção dos dados ao longo do caminhamento realizado reduz a obstrução pelo sub-bosque (BAUWENS et al., 2016). Enquanto o TLS base fixa, possui obstruções causadas pelo sub-bosque e troncos reduzindo o alcance, principalmente em áreas mais densa (VASCONCELLOS et al., 2021; DONAGER; SÁNCHEZ MEADOR; BLACKBURN, 2021). Com isso, metodologias alternativas têm sido desenvolvidas para coleta de dados com este tipo de Lidar, onde em uma mesma parcela há múltiplas coletas, reduzindo a obstrução (EHBRECHT et al., 2016; VASCONCELLOS et al., 2021). Entretanto, isto acarreta mais amostragem e tempo em campo e pós-processamento demorado (EHBRECHT et al., 2016). Fato que não ocorre com o Lidar TLS mobile, por se tratar de coleta única e contínua, resultando em uma única nuvem de pontos, reforçando ainda mais o seu potencial uso para o monitoramento da restauração de florestas tropicais.

Já o Lidar ALS-UAV, apresentou maior correlação com os outros indicadores de campo como cobertura de solo, altura (máxima, média, desvio padrão), número de indivíduos e área basal indivíduos arbóreos/arbustivos com  $DAP \geq 5$  cm. Isto ocorre por ser um sistema *top-down*, onde a maior concentração de pontos está nos estratos superiores da floresta e sua densidade de pontos é menor (LARUE et al., 2020). Ainda que estudos anteriores tenham encontrado relação entre métricas do ALS e o sub-bosque, eles ocorreram em florestas temperadas (LARUE et al., 2020) ou em plantios comerciais de eucaliptos (MELO et al., 2020), diferentemente, do nosso estudo que avaliou florestas tropicais com complexidade estrutural. Mesmo que a coleta de dados tenha sido realizada na estação seca (agosto) onde parte dos indivíduos arbóreos perder suas folhas, facilitando a penetração dos pulsos laser em direção ao solo. A perda de folhas do dossel não limita a mensuração da cobertura de solo, pois em nosso estudo consideramos clareiras as áreas em que a altura do dossel era inferior a 5 m e tamanho mínimo de 10 m<sup>2</sup>. O fato de sua limitada capacidade em avaliar o sub-bosque não reduz a capacidade do ALS-UAV no monitoramento da restauração, pois tem demonstrado potencial em mensurar outros indicadores como biomassa (ALMEIDA et al., 2021, ALMEIDA et al., 2019a) e cobertura de copa (ALMEIDA et al., 2019b). Por isso, o Lidar ALS-UAV tem sido apontado como uma tecnologia capaz de revolucionar o monitoramento da restauração devido a sua alta capacidade em cobrir grandes áreas, assim como o Lidar Aerotransportado por avião (DONAGER; SÁNCHEZ MEADOR; BLACKBURN, 2021). Uma estratégia que pode ser adotada no monitoramento da restauração é a combinação dos dados ALS-UAV com TLS-mobile, de forma que o primeiro ganha escala no monitoramento e o outro refina os dados obtidos em pontos estratégicos.

Quando estimamos a densidade de regenerantes a partir das regressões, notamos que para a Densidade total de regenerantes e Percentual de pontos entre 0.5 e 5 metros de altura (%) – TLS Mobile apenas uma parcela das vinte e cinco não obteve a mesma classificação em relação ao campo. Onde a sua classificação de campo era Mínimo e passou para Adequada, isso pode ter ocorrido por apresenta alta densidade de indivíduos com  $DAP \geq 5$  cm. Com isso, observamos que há outros fatores influenciam nas estimativas da densidade de regenerantes através de métricas Lidar que não foram estudados por este trabalho que poderão ser abordados por futuras pesquisas. Outro ponto que destacamos é que nossos dados, com a exceção de uma parcela, apresentaram classificação Adequada de Densidade de Regenerante segundo a Resolução SMA32/2014, possibilitando futuros trabalhos estudarem questões relacionadas à gradientes de densidade de regenerantes e idades para aprofundar na utilização desta ferramenta no Protocolo.

Apesar do potencial do Lidar em mensurar indicadores de estrutura florestal, ainda assim serão necessárias atividades de campo para obtenção de outros indicadores como diversidade e até mesmo identificar fatores de degradação (i.e. presença de gramíneas, presença de espécies arbóreas exóticas invasoras, presença de gado, presença de formigas e cupins, erosão do solo, entre outros), ainda imperceptíveis com a tecnologia Lidar. A utilização conjunta de outros sensores que complementam o Lidar tem se demonstrado promissor, como o caso do hiper espectral que permite a mensuração da diversidade (ALMEIDA et al., 2020; ALMEIDA et al., 2021b). Outro ponto importante de se destacar é a necessidade de especialistas no processamento de dados Lidar, além de Hardware e Software adequados para a sua utilização no monitoramento da restauração. Futuros

trabalhos poderão avaliar a efetividade da utilização desta tecnologia em larga escala em florestas tropicais, uma vez que o que tem se estudado é em escala experimental e em florestas temperadas, corroborando para o alcance das metas ambiciosas de restauração.

O Lidar já está presente no cotidiano das pessoas em smartphones (APPLE, 2022) e em carros autônomos (LI et al., 2017), ainda que com funções limitadas. Sendo assim, ele apresenta uma tendência de deixar de ser uma ferramenta para fins exclusivos de pesquisa e uso de especialistas. Com nossos resultados e a popularização do Lidar, abre a possibilidade de o público em geral apoiar no monitoramento participativo de forma similar ao que acontece com o Collect Earth (OPEN FORIS, 2022) e eBird (EBIRD, 2022), as quais são plataformas participativas alimentadas pelos usuários. Uma estratégia de restauração que viabiliza a conexão entre Unidades de Conservação que tem ganhado adeptos, são as trilhas de longo percurso, onde a proposta é fazer com que as trilhas sejam em áreas restauradas, formando grandes corredores. Com isso, o turista ao percorrer as trilhas poderá auxiliar no monitoramento da restauração usando seu smartphone, por exemplo.



## 5. CONCLUSÃO

Concluimos que tanto o Lidar TLS-mobile quanto o Lidar ALS-UAV podem ser utilizados para o monitoramento da restauração ativa de indicadores estruturais tradicionalmente mensurados em campo, pois suas métricas apresentaram correlação com estes indicadores, demonstrando assim seu potencial como importantes ferramentas para o monitoramento da restauração florestal em larga escala. Destacamos que o Lidar TLS-mobile possui vantagem quanto ao ALS-UAV para o monitoramento de indivíduos regenerantes por ser um sistema *bottom-up*, diferentemente do Lidar ALS-UAV, que é um sistema *top-down*. Os demais indicadores possuem correlação com as métricas geradas pelos dois tipos de sensor Lidar.

No entanto, levantamentos de campo ainda são necessários para a obtenção de informações sobre composição de espécies e presença/ausência de fatores de degradação (i.e. presença de gramíneas, presença de espécies arbóreas exóticas invasoras, presença de gado, presença de formigas e cupins, erosão do solo, entre outros). Novos estudos utilizando o sensoriamento remoto são importantes para identificar sensores e métricas que descrevam outros indicadores e até mesmo a sua aplicação em larga escala.



## REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, R. W. et al. Forest restoration monitoring protocol with a low-cost remotely piloted aircraft: Lessons learned from a case study in the brazilian atlantic forest. **Remote Sensing**, v. 13, n. 12, 2021.
- ALBUQUERQUE, R. W. et al. Mapping Key Indicators of Forest Restoration in the Amazon Using a Low-Cost Drone and Artificial Intelligence. **Remote Sensing**, v. 14, n. 4, p. 1–28, 2022.
- ALMEIDA, D. R. A. et al. The effectiveness of lidar remote sensing for monitoring forest cover attributes and landscape restoration. *Forest Ecology and Management*, v. 438, n. September 2018, p. 34–43, 2019a.
- ALMEIDA, D. R. A. et al. Monitoring the structure of forest restoration plantations with a drone-lidar system. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 79, n. December 2018, p. 192–198, 2019b.
- ALMEIDA, D. R. A. et al. A new era in forest restoration monitoring. **Restoration Ecology**, v. 28, n. 1, p. 8–11, 2020.
- ALMEIDA, D. R. A. et al. Monitoring restored tropical forest diversity and structure through UAV-borne hyperspectral and lidar fusion. **Remote Sensing of Environment**, v. 264, n. March, 2021.
- APPLE. **Meça a altura de uma pessoa com o iPhone**. Disponível em: <<https://support.apple.com/pt-br/guide/iphone/iph341d4a993/ios>>. Acesso em: 20 jun. 2022.
- BAKX, T. R. M. et al. Use and categorization of light detection and ranging vegetation metrics in avian diversity and species distribution research. **Diversity and Distributions**, v. 25, n. 7, p. 1045–1059, 2019.
- BAUWENS, S. et al. Forest inventory with terrestrial LiDAR: A comparison of static and hand-held mobile laser scanning. **Forests**, v. 7, n. 6, 2016.
- BERTACCHI, M. I. F. et al. Establishment of tree seedlings in the understory of restoration plantations: Natural regeneration and enrichment plantings. **Restoration Ecology**, v. 24, n. 1, p. 100–108, 2016.
- BRANCALION, P. H. S., GANDOLFI, S., RODRIGUES, R. R. Avaliação e Monitoramento de Projetos de Restauração Florestal. In: **Restauração Florestal**. [s.l.] Oficina de Textos, 2015.
- BRANCALION, P. H. S. et al. Finding the money for tropical forest restoration. **Unasyuva**, v. 63, n. 239, p. 41–50, 2012.



- BRANCALION, P. H. S. et al. Ecosystem restoration job creation potential in Brazil. **People And Nature**, n. April, p. 1–9, 2022.
- BRANCALION, P. H. S.; HOLL, K. D. Guidance for successful tree planting initiatives. **Journal of Applied Ecology**, v. 57, n. 12, p. 2349–2361, 2020.
- BROADBENT et al. **The GatorEye Unmanned Flying Laboratory: sensor fusion for 4D ecological analysis through custom hardware and algorithm integration**. Disponível em: <<http://www.speclab.org/gatoreye.html>>. Acesso em: 3 ago. 2022.
- CHALLENGE, B. **The Bonn Challenge**. Disponível em: <<https://www.bonnchallenge.org/>>. Acesso em: 20 jul. 2022.
- CHAVES, R. B. et al. On the need of legal frameworks for assessing restoration projects success: New perspectives from São Paulo state (Brazil). **Restoration Ecology**, v. 23, n. 6, p. 754–759, 2015.
- DASSOT, M.; CONSTANT, T.; FOURNIER, M. The use of terrestrial LiDAR technology in forest science: Application fields, benefits and challenges. **Annals of Forest Science**, v. 68, n. 5, p. 959–974, 2011.
- DE CONTO, T. et al. Performance of stem denoising and stem modelling algorithms on single tree point clouds from terrestrial laser scanning. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 143, n. October, p. 165–176, 2017.
- DONAGER, J. J.; SÁNCHEZ MEADOR, A. J.; BLACKBURN, R. C. Adjudicating perspectives on forest structure: How do airborne, terrestrial, and mobile lidar-derived estimates compare? **Remote Sensing**, v. 13, n. 12, p. 1–18, 2021.
- DURIGAN, G. O uso de indicadores para monitoramento de áreas em recuperação. In: **Cadernos da Mata Ciliar**. [s.l: s.n.]. p. 68.
- EBIRD. **eBird**. Disponível em: <<https://ebird.org/home>>. Acesso em: 10 ago. 2022.
- EHBRECHT, M. et al. Effective number of layers: A new measure for quantifying three-dimensional stand structure based on sampling with terrestrial LiDAR. **Forest Ecology and Management**, v. 380, p. 212–223, 2016.
- GANN, G. D. et al. International principles and standards for the practice of ecological restoration. Second edition. **Restoration Ecology**, v. 27, n. S1, p. S1–S46, 2019.

- GARDON, F. R.; SANTOS, R. F. DOS; RODRIGUES, R. R. Brazil's forest restoration, biomass and carbon stocks: A critical review of the knowledge gaps. **Forest Ecology and Management**, v. 462, n. November 2019, p. 117972, 2020.
- GEOSLAM. **Zeb Horizon**. Disponível em: <<https://geoslam.com/solutions/zeb-horizon/>>. Acesso em: 20 jun. 2022.
- GORGENS, E. B.; SILVA, A. G. P. DA; RODRIGUEZ, L. C. E. **LiDAR: Aplicações Florestais**. 1ª ed. Curitiba, PR: Editora CRV, 2014.
- HOUGHTON, R. A.; BYERS, B.; NASSIKAS, A. A. A role for tropical forests in stabilizing atmospheric CO<sub>2</sub>. **Nature Climate Change**, v. 5, n. 12, p. 1022–1023, 2015.
- INEA. Manual de procedimentos para o monitoramento e avaliação de áreas em restauração florestal no Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2019.
- INICIATIVE 20X20. **Iniciative 20x20**. Disponível em: <<https://initiative20x20.org/>>. Acesso em: 20 jul. 2022.
- LARUE, E. A. et al. Compatibility of aerial and terrestrial LiDAR for quantifying forest structural diversity. **Remote Sensing**, v. 12, n. 9, 2020.
- LI, J. et al. Real-time self-driving car navigation and obstacle avoidance using mobile 3D laser scanner and GNSS. **Multimedia Tools and Applications**, v. 76, n. 21, p. 23017–23039, 2017.
- LONDE, V. et al. Reference and comparison values for ecological indicators in assessing restoration areas in the Atlantic Forest. **Ecological Indicators**, v. 110, n. November 2019, p. 105928, 2020.
- MASCARO, J. et al. These are the days of lasers in the jungle. **Carbon Balance and Management**, v. 9, n. 1, p. 7–9, 2014.
- MASSI, K. G.; CHAVES, R. B.; TAMBOSI, L. R. Simple indicators are good proxies for ecological complexity when assessing Atlantic Forest restoration success. **Restoration Ecology**, v. 30, n. 3, 2022.
- MELO, A. M. et al. Monitoring the understory in eucalyptus plantations using airborne laser scanning. **Scientia Agricola**, v. 78, n. 1, p. 1–6, 2020.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Plano nacional de recuperação da vegetação nativa**. 2017
- MST. **Plantar árvores Produzir alimentos saudáveis**. Disponível em: <<https://mst.org.br/especiais/plantar-arvores-produzir-alimentos-saudaveis/>>. Acesso em: 20 ago. 2022.

NEWMARK, W. D. et al. Targeted habitat restoration can reduce extinction rates in fragmented forests. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 114, n. 36, p. 9635–9640, 2017.

OPEN FORIS. **Collect Earth**. Disponível em: <<https://openforis.org/>>. Acesso em: 10 ago. 2022.

PACTO. **Sobre o PACTO**. Disponível em: <<https://www.pactomataatlantica.org.br/o-movimento/>>. Acesso em: 20 jul. 2022.

PACTO. **Protocolo de Monitoramento para Programas e Projetos de Restauração Florestal**. 2013.

POSSINGHAM, H. P.; BODE, M.; KLEIN, C. J. Optimal Conservation Outcomes Require Both Restoration and Protection. **PLoS Biology**, v. 13, n. 1, p. 1–15, 2015.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing.**, 2022. Disponível em: <<https://www.r-project.org/>>

SÃO PAULO (Estado). Resolução nº 32, de 03 de abril de 2014. Estabelece as orientações, diretrizes e critérios sobre restauração ecológica no Estado de São Paulo, e dá providências correlatas.. **Resolução SMA Nº 32**. São Paulo, SP, 05 abr. 2014.

SÃO PAULO (Estado). Portaria nº 01, de 2015. Estabelece o Protocolo de Monitoramento de Projetos de Restauração Ecológica. **Portaria CBRN 01/2015**. São Paulo, SP, 17 jan. 2015.

SOARES-FILHO, B. et al. Cracking Brazil's Forest Code. **Science**, v. 344, n. 6182, p. 363 LP – 364, 2014.

SORRINI, Taísi Bech. **Restaurando o campus: envolvendo alunos e plantando árvores para a transformação ambiental da ESALQ/USP**. 2021. 65 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Recursos Florestais, Ciências Florestais, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2021.

SUGANUMA, M. S.; DURIGAN, G. Indicators of restoration success in riparian tropical forests using multiple reference ecosystems. **Restoration Ecology**, v. 23, n. 3, p. 238–251, 2015.

SUNDERLIN, W. D. et al. Livelihoods, forests, and conservation in developing countries: An overview. **World Development**, v. 33, n. 9 SPEC. ISS., p. 1383–1402, 2005.

TNC. **Restaura Brasil**. Disponível em: <<https://www.tnc.org.br/o-que-fazemos/nossas-iniciativas/restaura-brasil/>>. Acesso em: 20 ago. 2022.

- VALBUENA, R. et al. Standardizing Ecosystem Morphological Traits from 3D Information Sources. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 35, n. 8, p. 656–667, 2020.
- VASCONCELLOS, B. N. DE et al. **Guia metodológico para uso do Laser Scanner Terrestre (TLS) em ambiente florestal**. Colombo, PR: [s.n.].
- VIANI, R. A. G. et al. Monitoring Young Tropical Forest Restoration Sites: How Much to Measure? **Tropical Conservation Science**, v. 11, 2018.
- ZAHAWI, R. A. et al. Using lightweight unmanned aerial vehicles to monitor tropical forest recovery. **Biological Conservation**, v. 186, p. 287–295, 2015.
- ZANINI, A. M. et al. The effect of ecological restoration methods on carbon stocks in the Brazilian Atlantic Forest. **Forest Ecology and Management**, v. 481, n. November 2020, p. 118734, 2021.



## ANEXOS

**ANEXO A.** Indicadores de estrutura em protocolos de monitoramento em campo de projetos de Projetos de Restauração Florestal (PACTO, 2013; SMA32/2014; INEA 2017).

<b>Indicador presentes nos Protocolos de Monitoramento em campo</b>	<b>PACTO</b>	<b>SMA 32</b>	<b>INEA (2017)</b>	<b>Adicional</b>
Número de indivíduos regenerantes	x	x	x	
Número de indivíduos adultos	x			
Área basal	x			
Cobertura de copa	x	x	x	
Altura média			x	
Altura máxima				x
Desvio Padrão da altura				x

**ANEXO B.** Resultado das correlações de Pearson entre as 17 métricas obtidas dos dois sensores Lidar (TLS-Mobile e ALS-UAV), com seus respectivos valores de r e p-value, bem como o número de parcelas usadas em cada uma das correlações.

Métrica	Pearson		n
	r	p-value	
Altura máxima (m)	0.7692	0.0000	26
Altura média (m)	0.5260	0.0058	26
Desvio Padrão da Altura (m)	0.5573	0.0031	26
Assimetria da altura	-0.3568	0.0736	26
Curtose da altura	0.1805	0.3776	26
Percentual de pontos acima da altura média (%)	-0.5276	0.0056	26
Percentual de pontos acima de 2 m de altura (%)	0.1318	0.5209	26
Percentil 25 (m)	0.0059	0.9771	26
Percentil 50 (m)	0.1492	0.4671	26
Percentil 75 (m)	0.1254	0.5414	26
Percentil 95 (m)	0.7681	0.0000	26
Percentual de pontos entre 0.5 e 2 m (%)	0.6714	0.0002	26
Percentual de pontos entre 2 e 5 m (%)	0.4162	0.0344	26
Percentual de pontos entre 0.5 e 5 m (%)	0.5705	0.0023	26
CHM Médio (m)	0.9405	0.0000	26
Desvio Padrão do CHM (m)	0.5409	0.0043	26
Cobertura de copa (%)	0.4525	0.0264	24

**ANEXO C.** Correlações entre as métricas Lidar (TLS mobile e ALS-UAV) com os indicadores de campo.

Indicadores de campo	Métrica Lidar: Altura máxima (m)							
	TLS mobile				ALS UAV			
	Pearson		Spearman		Pearson		Spearman	
	r	p-value	r	p-value	r	p-value	r	p-value
Altura máxima (m)	0.8320	0.0000	0.7676	0.0000	0.5213	0.0154	0.5356	0.0123
Altura média (m)	0.7888	0.0000	0.7245	0.0000	0.5725	0.0067	0.6758	0.0008
Desvio Padrão da Altura (m)	0.8630	0.0000	0.8772	0.0000	0.6195	0.0027	0.6909	0.0005
Densidade de indivíduos DAP ≥ 5cm	-0.0190	0.9141	-0.1625	0.3510	-0.4141	0.0355	-0.4056	0.0398
Área basal (m <sup>2</sup> /parcela)	0.8340	0.0000	0.8297	0.0000	0.6624	0.0002	0.6862	0.0001
Cobertura de copa (%)	0.6040	0.0001	0.6037	0.0001	0.3436	0.0857	0.5578	0.0031
Densidade de regenerantes (0.5 - 2m)	0.1155	0.5584	0.0890	0.6525	-0.1553	0.5255	-0.1062	0.6651
Densidade de regenerantes (≥ 2m)	0.0297	0.8720	0.1824	0.3177	-0.1595	0.4565	-0.0165	0.9389
	Métrica Lidar: Altura média (m)							
Altura máxima (m)	0.4990	0.0050	0.3525	0.0561	0.4575	0.0370	0.6344	0.0020
Altura média (m)	0.7446	0.0000	0.6893	0.0000	0.6730	0.0008	0.8278	0.0000
Desvio Padrão da Altura (m)	0.5308	0.0025	0.5230	0.0030	0.6208	0.0027	0.8026	0.0000
Densidade de indivíduos DAP ≥ 5cm	0.1178	0.5002	-0.0653	0.7095	-0.3765	0.0580	-0.3834	0.0532
Área basal (m <sup>2</sup> /parcela)	0.5629	0.0004	0.6473	0.0000	0.7590	0.0000	0.7853	0.0000
Cobertura de copa (%)	0.7065	0.0000	0.4528	0.0063	0.3100	0.1232	0.5160	0.0070
Densidade de regenerantes (0.5 - 2m)	0.0666	0.7362	-0.0824	0.6767	0.1592	0.5150	0.1449	0.5540
Densidade de regenerantes (≥ 2m)	-0.1480	0.4190	-0.0372	0.8398	0.0448	0.8352	0.2357	0.2676
	Métrica Lidar: Desvio Padrão da Altura (m)							
Altura máxima (m)	0.5610	0.0013	0.4337	0.0166	0.4537	0.0388	0.0669	0.7731
Altura média (m)	0.8056	0.0000	0.7694	0.0000	0.4975	0.0217	0.3255	0.1499
Desvio Padrão da Altura (m)	0.6280	0.0002	0.6129	0.0003	0.3985	0.0736	0.1857	0.4203
Densidade de indivíduos DAP ≥ 5cm	-0.0030	0.9868	-0.1408	0.4199	-0.1151	0.5757	0.0260	0.8997
Área basal (m <sup>2</sup> /parcela)	0.6450	0.0000	0.7599	0.0000	0.7106	0.0000	0.6041	0.0011
Cobertura de copa (%)	0.6240	0.0001	0.4974	0.0024	0.1909	0.3502	0.2821	0.1626
Densidade de regenerantes (0.5 - 2m)	0.0481	0.8078	-0.0570	0.7734	0.0158	0.9488	0.0430	0.8612
Densidade de regenerantes (≥ 2m)	-0.1487	0.4166	0.0345	0.8515	-0.0349	0.8713	0.1513	0.4803
	Métrica Lidar: Assimetria da altura							
Altura máxima (m)	0.4160	0.0223	0.3116	0.0937	-0.1334	0.5644	-0.1794	0.4365
Altura média (m)	0.3441	0.0626	0.2519	0.1792	-0.6528	0.0013	-0.7381	0.0001
Desvio Padrão da Altura (m)	0.5130	0.0038	0.3833	0.0365	-0.3588	0.1102	-0.4065	0.0675
Densidade de indivíduos DAP ≥ 5cm	-0.2120	0.2220	-0.3195	0.0613	0.2549	0.2088	0.2521	0.2142
Área basal (m <sup>2</sup> /parcela)	0.5830	0.0002	0.4132	0.0136	-0.4620	0.0175	-0.4325	0.0273
Cobertura de copa (%)	0.1130	0.5192	0.2896	0.0915	-0.2162	0.2889	-0.2503	0.2175
Densidade de regenerantes (0.5 - 2m)	0.2333	0.2322	0.1224	0.5349	-0.2951	0.2201	-0.3196	0.1823
Densidade de regenerantes (≥ 2m)	0.2998	0.0955	0.3476	0.0513	-0.1348	0.5301	-0.1922	0.3683



Indicadores de campo	Métrica Lidar: Curtose da altura							
	TLS mobile				ALS UAV			
	Pearson		Spearman		Pearson		Spearman	
	r	p-value	r	p-value	r	p-value	r	p-value
Altura máxima (m)	0.4920	0.0057	0.3585	0.0517	0.1599	0.4888	0.3718	0.0970
Altura média (m)	0.3611	0.0500	0.1738	0.3583	0.4548	0.0383	0.4399	0.0460
Desvio Padrão da Altura (m)	0.5470	0.0018	0.3766	0.0402	0.3230	0.1532	0.5208	0.0155
Densidade de indivíduos DAP $\geq$ 5cm	-0.1180	0.4979	-0.2367	0.1709	-0.3091	0.1244	-0.3594	0.0713
Área basal (m <sup>2</sup> /parcela)	0.7000	0.0000	0.3577	0.0349	0.2883	0.1531	0.3443	0.0850
Cobertura de copa (%)	0.1720	0.3216	0.2823	0.1003	0.1718	0.4015	0.2751	0.1737
Densidade de regenerantes (0.5 - 2m)	0.1892	0.3350	0.2103	0.2828	-0.1629	0.5053	0.0773	0.7532
Densidade de regenerantes ( $\geq$ 2m)	0.3682	0.0381	0.3291	0.0659	-0.1330	0.5355	0.0096	0.9646
	Métrica Lidar: Percentual de pontos acima da altura média (%)							
Altura máxima (m)	-0.0110	0.9551	-0.0171	0.9284	0.0336	0.8851	0.0136	0.9532
Altura média (m)	-0.1702	0.3687	-0.3132	0.0920	0.5832	0.0055	0.6771	0.0007
Desvio Padrão da Altura (m)	-0.2080	0.2690	-0.2325	0.2164	0.1997	0.3854	0.2026	0.3785
Densidade de indivíduos DAP $\geq$ 5cm	0.4750	0.0040	0.4879	0.0029	-0.1226	0.5508	-0.0937	0.6489
Área basal (m <sup>2</sup> /parcela)	-0.1290	0.4599	-0.3874	0.0215	0.3641	0.0674	0.3012	0.1348
Cobertura de copa (%)	0.2550	0.1383	-0.0985	0.5735	0.0867	0.6737	0.1378	0.5020
Densidade de regenerantes (0.5 - 2m)	0.0020	0.9918	-0.0359	0.8562	0.3777	0.1109	0.3275	0.1711
Densidade de regenerantes ( $\geq$ 2m)	-0.0192	0.9168	-0.3204	0.0738	0.1736	0.4173	0.2513	0.2362
	Métrica Lidar: Percentual de pontos acima de 2 m de altura (%)							
Altura máxima (m)	0.5290	0.0027	0.2586	0.1676	0.3890	0.0813	0.5063	0.0192
Altura média (m)	0.6491	0.0001	0.4543	0.0117	0.3944	0.0769	0.3886	0.0817
Desvio Padrão da Altura (m)	0.4738	0.0082	0.3646	0.0476	0.4873	0.0250	0.6364	0.0019
Densidade de indivíduos DAP $\geq$ 5cm	0.3404	0.0454	0.1427	0.4133	-0.2126	0.2970	-0.3512	0.0785
Área basal (m <sup>2</sup> /parcela)	0.5262	0.0012	0.4465	0.0072	0.4594	0.0182	0.4776	0.0136
Cobertura de copa (%)	0.8213	0.0000	0.3648	0.0312	0.3446	0.0847	0.3438	0.0855
Densidade de regenerantes (0.5 - 2m)	0.1873	0.3400	-0.1128	0.5676	0.2864	0.2346	0.0474	0.8472
Densidade de regenerantes ( $\geq$ 2m)	-0.0355	0.8469	-0.2064	0.2570	0.2059	0.3343	0.0226	0.9165
	Métrica Lidar: Percentil 25 (m)							
Altura máxima (m)	0.1750	0.3555	0.2412	0.1991	0.3854	0.0844	0.5929	0.0046
Altura média (m)	0.2996	0.1077	0.3330	0.0722	0.5956	0.0044	0.7801	0.0000
Desvio Padrão da Altura (m)	0.3140	0.0907	0.3993	0.0288	0.5724	0.0067	0.7659	0.0001
Densidade de indivíduos DAP $\geq$ 5cm	-0.1530	0.3809	-0.1723	0.3223	-0.3769	0.0577	-0.4935	0.0104
Área basal (m <sup>2</sup> /parcela)	0.1220	0.4860	0.2235	0.1968	0.6281	0.0006	0.6117	0.0009
Cobertura de copa (%)	0.3210	0.0605	0.2437	0.1584	0.2679	0.1858	0.3580	0.0726
Densidade de regenerantes (0.5 - 2m)	0.4812	0.0095	0.4677	0.0121	0.1895	0.4371	0.0939	0.7021
Densidade de regenerantes ( $\geq$ 2m)	0.3344	0.0614	0.6766	0.0000	0.1130	0.5991	0.2419	0.2547

Indicadores de campo	Métrica Lidar: Percentil 50 (m)							
	TLS mobile				ALS UAV			
	Pearson		Spearman		Pearson		Spearman	
	r	p-value	r	p-value	r	p-value	r	p-value
Altura máxima (m)	0.4640	0.0098	0.2237	0.2348	0.4552	0.0381	0.5362	0.0122
Altura média (m)	0.6252	0.0002	0.4465	0.0134	0.7148	0.0003	0.8441	0.0000
Desvio Padrão da Altura (m)	0.4250	0.0191	0.3344	0.0709	0.6086	0.0034	0.7195	0.0002
Densidade de indivíduos DAP $\geq$ 5cm	0.3200	0.0609	0.1600	0.3586	-0.3499	0.0797	-0.3444	0.0849
Área basal (m <sup>2</sup> /parcela)	0.5050	0.0020	0.4146	0.0133	0.7710	0.0000	0.7607	0.0000
Cobertura de copa (%)	0.8020	0.0000	0.3629	0.0321	0.3112	0.1218	0.4354	0.0262
Densidade de regenerantes (0.5 - 2m)	0.1405	0.4757	-0.1024	0.6041	0.2183	0.3693	0.2177	0.3705
Densidade de regenerantes ( $\geq$ 2m)	-0.0857	0.6409	-0.2348	0.1958	0.0749	0.7279	0.2696	0.2027
	Métrica Lidar: Percentil 75 (m)							
Altura máxima (m)	0.3540	0.0547	0.2099	0.2657	0.4929	0.0232	0.5557	0.0089
Altura média (m)	0.5847	0.0007	0.4761	0.0078	0.7140	0.0003	0.8259	0.0000
Desvio Padrão da Altura (m)	0.3440	0.0626	0.3148	0.0902	0.6390	0.0018	0.7390	0.0001
Densidade de indivíduos DAP $\geq$ 5cm	0.1770	0.3093	0.0960	0.5835	-0.3511	0.0786	-0.3605	0.0705
Área basal (m <sup>2</sup> /parcela)	0.4150	0.0132	0.4238	0.0112	0.8402	0.0000	0.8209	0.0000
Cobertura de copa (%)	0.6130	0.0001	0.2928	0.0878	0.3253	0.1048	0.5319	0.0052
Densidade de regenerantes (0.5 - 2m)	-0.0245	0.9017	-0.1183	0.5488	0.1612	0.5098	0.1835	0.4521
Densidade de regenerantes ( $\geq$ 2m)	-0.2412	0.1835	-0.2099	0.2489	0.0396	0.8542	0.2209	0.2997
	Métrica Lidar: Percentil 95 (m)							
Altura máxima (m)	0.4870	0.0063	0.3349	0.0704	0.5894	0.0049	0.6597	0.0011
Altura média (m)	0.7622	0.0000	0.6846	0.0000	0.6760	0.0008	0.7037	0.0004
Desvio Padrão da Altura (m)	0.5720	0.0010	0.5466	0.0018	0.6785	0.0007	0.7922	0.0000
Densidade de indivíduos DAP $\geq$ 5cm	-0.0140	0.9345	-0.1586	0.3629	-0.3596	0.0712	-0.3813	0.0546
Área basal (m <sup>2</sup> /parcela)	0.5550	0.0005	0.6941	0.0000	0.8476	0.0000	0.8468	0.0000
Cobertura de copa (%)	0.6170	0.0001	0.4707	0.0043	0.3117	0.1211	0.5239	0.0060
Densidade de regenerantes (0.5 - 2m)	0.0640	0.7464	-0.0068	0.9724	0.0136	0.9559	0.0729	0.7669
Densidade de regenerantes ( $\geq$ 2m)	-0.1413	0.4404	0.0627	0.7332	-0.0419	0.8460	0.1374	0.5220
	Métrica Lidar: Percentual de pontos entre 0.5 e 2 m (%)							
Altura máxima (m)	-0.0940	0.6221	0.0243	0.8988	-0.2456	0.2832	-0.0897	0.6990
Altura média (m)	-0.1832	0.3326	-0.1476	0.4365	-0.3609	0.1080	-0.4048	0.0687
Desvio Padrão da Altura (m)	-0.0080	0.0010	0.0616	0.7463	-0.2749	0.2278	-0.2701	0.2363
Densidade de indivíduos DAP $\geq$ 5cm	-0.1170	0.5025	-0.3107	0.0693	-0.0096	0.9627	0.1245	0.5446
Área basal (m <sup>2</sup> /parcela)	-0.1740	0.3177	-0.1739	0.3176	-0.5300	0.0054	-0.4256	0.0302
Cobertura de copa (%)	-0.1270	0.4674	-0.0909	0.6036	-0.1530	0.4554	-0.2552	0.2082
Densidade de regenerantes (0.5 - 2m)	0.4693	0.0118	0.3812	0.0454	0.0898	0.7146	0.1036	0.6730
Densidade de regenerantes ( $\geq$ 2m)	0.5414	0.0014	0.5890	0.0004	0.2104	0.3237	0.3870	0.0618

Indicadores de campo	Métrica Lidar: Percentual de pontos entre 2 e 5 m (%)							
	TLS mobile				ALS UAV			
	Pearson		Spearman		Pearson		Spearman	
	r	p-value	r	p-value	r	p-value	r	p-value
Altura máxima (m)	0.5810	0.0008	0.3378	0.0679	-0.2399	0.2949	-0.3133	0.1667
Altura média (m)	0.4206	0.0206	-0.0162	0.9321	-0.6551	0.0013	-0.7368	0.0001
Desvio Padrão da Altura (m)	0.4560	0.0114	0.1929	0.3072	-0.4395	0.0462	-0.5091	0.0184
Densidade de indivíduos DAP $\geq$ 5cm	0.4570	0.0058	0.2835	0.0988	0.2914	0.1487	0.3321	0.0974
Área basal (m <sup>2</sup> /parcela)	0.4100	0.0143	-0.0347	0.8430	-0.6748	0.0002	-0.6581	0.0003
Cobertura de copa (%)	0.7260	0.0000	0.1553	0.3731	-0.1913	0.3493	-0.3140	0.1183
Densidade de regenerantes (0.5 - 2m)	0.4117	0.0295	0.4189	0.0265	-0.0761	0.7568	0.0132	0.9573
Densidade de regenerantes ( $\geq$ 2m)	0.3219	0.0724	0.2779	0.1235	0.1679	0.4328	0.0522	0.8087
	Métrica Lidar: Percentual de pontos entre 0.5 e 5 m (%)							
Altura máxima (m)	0.3130	0.0919	0.2829	0.1299	-0.2562	0.2622	-0.2931	0.1972
Altura média (m)	0.1404	0.4593	-0.0042	0.9823	-0.6240	0.0025	-0.6842	0.0006
Desvio Padrão da Altura (m)	0.2950	0.1137	0.2854	0.1263	-0.4266	0.0538	-0.5000	0.0210
Densidade de indivíduos DAP $\geq$ 5cm	0.2140	0.2174	0.0307	0.8611	0.2230	0.2735	0.3215	0.1093
Área basal (m <sup>2</sup> /parcela)	0.1420	0.4148	-0.0510	0.7712	-0.6767	0.0001	-0.6595	0.0002
Cobertura de copa (%)	0.3830	0.0230	0.1654	0.3425	-0.1926	0.3458	-0.3259	0.1042
Densidade de regenerantes (0.5 - 2m)	0.5982	0.0008	0.5487	0.0025	-0.0367	0.8816	0.0667	0.7861
Densidade de regenerantes ( $\geq$ 2m)	0.5932	0.0003	0.6170	0.0002	0.1926	0.3673	0.0843	0.6952
	Métrica Lidar: CHM Médio (m)							
Altura máxima (m)	0.7110	0.0000	0.5964	0.0005	0.4965	0.0221	0.4452	0.0431
Altura média (m)	0.8320	0.0000	0.8504	0.0000	0.7379	0.0001	0.7804	0.0000
Desvio Padrão da Altura (m)	0.7890	0.0000	0.7815	0.0000	0.5901	0.0049	0.6156	0.0030
Densidade de indivíduos DAP $\geq$ 5cm	0.0040	0.9803	-0.1201	0.4921	-0.3049	0.1298	-0.2329	0.2522
Área basal (m <sup>2</sup> /parcela)	0.8610	0.0000	0.8938	0.0000	0.8686	0.0000	0.8619	0.0000
Cobertura de copa (%)	0.6100	0.0001	0.6148	0.0001	0.3449	0.0844	0.5458	0.0039
Densidade de regenerantes (0.5 - 2m)	0.1737	0.3767	0.1399	0.4776	0.0998	0.6843	0.1475	0.5468
Densidade de regenerantes ( $\geq$ 2m)	0.0648	0.7246	0.2907	0.1065	0.0168	0.9378	0.1696	0.4283
	Métrica Lidar: Desvio Padrão do CHM (m)							
Altura máxima (m)	0.7330	0.0000	0.6556	0.0001	0.3230	0.1532	0.3354	0.1372
Altura média (m)	0.4828	0.0069	0.3209	0.0838	-0.0485	0.8345	-0.1618	0.4835
Desvio Padrão da Altura (m)	0.7150	0.0000	0.6472	0.0001	0.3328	0.1404	0.3234	0.1527
Densidade de indivíduos DAP $\geq$ 5cm	-0.1110	0.5250	-0.2090	0.2282	-0.2871	0.1550	-0.3225	0.1081
Área basal (m <sup>2</sup> /parcela)	0.5900	0.0002	0.4507	0.0066	0.3123	0.1204	0.2520	0.2143
Cobertura de copa (%)	0.4310	0.0097	0.3180	0.0627	0.0353	0.8642	0.0642	0.7554
Densidade de regenerantes (0.5 - 2m)	0.0944	0.6328	0.0022	0.9912	-0.4348	0.0628	-0.3889	0.0998
Densidade de regenerantes ( $\geq$ 2m)	0.0137	0.9409	-0.0981	0.5933	-0.3100	0.1404	-0.2713	0.1997

Indicadores de campo	Métrica Lidar: Cobertura de copa (%)							
	TLS mobile				ALS UAV			
	Pearson		Spearman		Pearson		Spearman	
	r	p-value	r	p-value	r	p-value	r	p-value
Altura máxima (m)	0.4400	0.0196	0.2213	0.2399	0.0266	0.9194	0.1094	0.6760
Altura média (m)	0.6730	0.0000	0.5838	0.0007	0.4725	0.0555	0.5584	0.0198
Desvio Padrão da Altura (m)	0.4220	0.0201	0.3430	0.0635	0.0810	0.7574	0.2329	0.3683
Densidade de indivíduos DAP $\geq$ 5cm	0.4750	0.0039	0.2555	0.1386	-0.0552	0.9375	-0.1152	0.6597
Área basal (m <sup>2</sup> /parcela)	0.5480	0.0007	0.5903	0.0002	0.4112	0.1010	0.4555	0.0662
Cobertura de copa (%)	0.8040	0.0000	0.4214	0.0117	0.2327	0.3687	0.3881	0.1237
Densidade de regenerantes (0.5 - 2m)	0.4844	0.0090	0.4471	0.0171	0.2974	0.2463	0.1625	0.5332
Densidade de regenerantes ( $\geq$ 2m)	0.3255	0.0691	0.5386	0.0015	0.2974	0.2464	0.3377	0.1849

**ANEXO D.** Níveis de adequação da densidade de regenerantes segundo a SMA32/2014.

<b>Idade</b>	<b>Densidade de indivíduos nativos regenerantes (ind/ha)</b>		
	<b>Crítico</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Adequado</b>
3	-	0 a 200	acima de 200
5	0 a 200	200 a 1000	acima de 1000
10	0 a 1000	1000 a 2000	acima de 2000
15	0 a 2000	2000 a 2500	acima de 2500
20	0 a 3000	-	acima de 3000

**ANEXO E.** Histograma de distribuição dos resíduos da regressão obtida entre a métrica Lidar TLS mobile, Percentual de pontos entre 0.5 e 5 metros e a densidade total de regenerantes.

