

MONITORAMENTO DA ESTRUTURA DE PLANTIOS DE RESTAURAÇÃO FLORESTAL ESTABELECIDOS SOB DIFERENTES INTENSIDADES DE MANEJO USANDO DRONE-LIDAR

Danilo Roberti Alves de Almeida ¹, Eben Broadbent ², Angelica Almeyda Zambrano ², Scott Christopher Stark ³, Daniel de Almeida Papa ⁴, Eric Bastos Gorgens ⁵, Carlos Alberto Silva ⁶ e Pedro Henrique Santin Brancalion ¹

¹Universidade de São Paulo - USP/ESALQ Caixa Postal 96 - 13416-000 - Piracicaba - SP, Brasil, {daniloflorestas, pedrobrancalion}@gmail.com; ²University of Florida - 303 Reed Lab PO Box 110565 Gainesville FL 32611-0565, {eben, aalmeyda}@ufl.edu; ³Michigan State University - Department of Forestry, East Lansing - MI - 48824 - USA, scott.c.stark@gmail.com; ⁴ Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA Caixa Postal 321 - BR-364 - Km 14, Rio Branco - AC, Brasil, daniel.papa@embrapa.br; ⁵ Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri - Campus JK, Departamento de Engenharia Florestal. Rodovia MGT 367 - Km 583, nº 5000 e.gorgens@gmail.com e Biosciences Laboratory, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20707, USA, carlos_engflorestal@outlook.com

RESUMO

Monitoramos um experimento de restauração florestal ativa (plântio de espécies nativas) a partir da caracterização da estrutura do dossel florestal usando sensoriamento remoto Lidar acoplado em plataforma drone. O experimento, localizado na cidade de Anhembi no interior de São Paulo (bioma Mata Atlântica), possui dois níveis de espaçamento de plântio (3x1 e 3x2 m) e dois níveis de manejo (tradicional e intensivo), totalizando quatro tratamentos. Foram analisadas três variáveis estruturais derivadas do Lidar (altura do dossel, rugosidade e o índice de área foliar) e uma variável de campo (BAS – biomassa de madeira seca acima do solo). A caracterização das diferenças estruturais entre os tratamentos possibilitou a compreensão e discussão das hipóteses ecológicas dentro de cada sistema de restauração florestal.

Palavras-chave — sensoriamento remoto, IAF, DAF, Mata Atlântica, restauração ativa.

ABSTRACT

We monitored an active forest restoration experiment (native species plantation) from the characterization of the forest canopy structure using a drone-borne Lidar system. The experiment, located at the interior of São Paulo (Atlantic Forest Biome), has two levels of planting spacing (3x1 and 3x2 m) and two management levels (Traditional and Intensive), totaling four treatments. We analyzed three structural variables from Lidar (canopy height, rugosity and leaf area index) and one from field inventory (AGB – above ground woody dry biomass). The characterization of the structural differences between the treatments allowed the understanding and discussion of the ecological hypotheses within each forest restoration system.

Key words — remote sensing, LAI, LAD, Atlantic Forest, active restoration.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente vivemos um momento ímpar de oportunidades para restauração florestal. Diversos acordos globais e regionais estão sendo feitos para recuperar áreas degradadas em paisagens florestais. Essas paisagens florestais podem trazer diversos benefícios para a sociedade, como a conservação da biodiversidade, fixação de gases do efeito estufa, equilíbrio do clima, proteção do solo e dos ciclos hidrológicos, recreação entre outros [1].

Os métodos utilizados na restauração florestal dependem do histórico de uso do solo e, conseqüentemente, do nível de degradação e resiliência (capacidade da paisagem degradada se recuperar ao estágio de floresta natural madura). Em muitos casos a restauração pode ser feita de maneira passiva, onde o simples isolamento da área já é o suficiente para regeneração natural acontecer [2]. Estas áreas normalmente apresentam baixo nível de degradação e baixa intensidade de espécies invasoras competidores.

Por outro lado, em áreas com alta degradação e baixa resiliência, pode ser necessário o uso de métodos ativos de alta intensidade, com o plântio adensado de mudas arbóreas de espécies nativas pioneiras e secundárias e o combate de espécies invasoras. Alguns fatores como a proporção de espécies pioneiras/não-pioneiras, espaçamento de plântio silvicultural e o método de combate das espécies invasoras (capina manual ou agrotóxico) são determinantes para o sucesso e viabilidade da restauração florestal ativa [3].

No presente estudo monitoramos diferentes intensidades de manejo em plantios de restauração florestal ativa no bioma Mata Atlântica a partir de dados de inventário de campo e sensoriamento remoto Lidar (*Light Detection and Ranging*) em plataforma drone.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

O estudo foi realizado na estação experimental de ciências florestais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ/USP) localizada na cidade de Anhembi, SP (22°43' S, 48°11' W, altitude de 455 m acima do nível do mar e declividade do terreno menor que 2%). 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 20,6 °C com médias de 16,8°C em julho e 23,5°C em fevereiro.

2.2. Delineamento amostral

O experimento de restauração florestal ativa foi implantado em março de 2004 com o plantio de 20 espécies arbóreas em uma área de pasto. O delineamento amostral foi um fatorial 2^3 , com oito tratamentos distribuídos aleatoriamente com quatro repetições, totalizando 32 parcelas de 1.260 m² (42x30 m) para propiciar um *buffer* ao entorno da parcela interna de 792 m² (36x22 m).

Os dois níveis de cada fator foram: (i) proporção de espécies pioneiras e não-pioneiras: 50:50 e 67:33; (ii) adensamento de plantio (espaçamento): 3x1 m (3.333 plantas ha⁻¹) e 3x2 m (1.667 plantas ha⁻¹); (iii) intensidade de manejo pós plantio: manejo tradicional (com uso moderado de corte mecânico do mato-competição e adubação das mudas arbóreas) e intensivo (com o uso intensivo de glifosato para eliminar o mato competição e alta frequência de adubação para as mudas arbóreas). No presente estudo fixamos o nível 50:50 do fator “proporção de espécies pioneiras e não-pioneiras”, utilizamos apenas 16 parcelas. Ver [3] e [4] para maiores detalhes.

2.3. Coleta de dados

No segundo semestre de 2016 as parcelas foram inventariadas com a mensuração do diâmetro à altura de 0.3 m do solo e altura de todos os indivíduos arbóreos. A partir destas métricas, mais a densidade média da madeira de cada espécie, estimamos a biomassa de madeira seca acima do solo (BAS) por uma equação desenvolvida no mesmo sítio do presente estudo [4].

Em junho de 2018, foram coletados os dados de sensoriamento remoto Lidar em plataforma ARP (Aeronave Remotamente Pilotada; conhecida popularmente como drone) pelo sistema GatorEye (Figura 1). O vôo foi feito à 60 metros de altura e velocidade de 10 m s⁻¹, produzindo uma nuvem Lidar com densidade média de 193 retornos m⁻².



Figura 1. Sistema GatorEye (<http://www.speclab.org/gatoreye>). Drone: DJI Matrice 600 Pro hexacopter. Sensor Lidar: Phoenix VLP-16 (frequência de 300.000 pulsos/seg e até dois retornos por pulso).

2.4. Processamento e análise dos dados

O processamento dos dados Lidar foi realizado em ambiente R [5] com o uso das funções do LAStools [6]. Primeiramente, a partir da nuvem Lidar bruta, classificamos os retornos que atingiram o solo e geramos o modelo digital de terreno (MDT) com 0,5 m de resolução. Depois, também a partir da nuvem Lidar bruta, realizamos o filtro de pontos espúrios e geramos o modelo digital de superfície (MDS) com 0,5 m de resolução. Com o MDT e MDS removemos os dados espúrios inferiores e superiores da nuvem Lidar bruta, e geramos a nuvem Lidar normalizada. E finalmente pela diferença entre o MDS pelo MDT foi gerado o modelo digital de altura (MDA) com resolução de 0,5 m.

O MDA e a nuvem normalizada foram cortadas a partir dos polígonos das parcelas georreferenciadas em campo. Georreferenciamos os dos quatro cantos de cada parcela retangular em campo com um sistema GNSS RTK de alta precisão.

Foram estimadas três variáveis estruturais do dossel, sendo duas derivadas do MDA e uma da nuvem normalizada, para cada parcela: (i) a altura do dossel (média do MDA); (ii) a rugosidade (desvio padrão do MDA) e (iii) o índice de área foliar (IAF - soma do perfil de densidade de área foliar). O perfil de densidade de área foliar (DAF) foi estimado pela equação de MacArthur-Horn [7] e método descrito em [8]. Para a modelagem do LAD foi utilizado apenas do primeiros retornos com ângulo máximo de escaneamento de 10° em relação ao nadir.

As três variáveis estruturais do dossel e a BAS foram testadas entre os tratamentos com análise de variância (ANAVA) *posthoc* Tukey-HSD. O perfil DAF foi analisado graficamente.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De maneira geral, os plantios com maior adensamento (espaçamento 3x1 m) apresentaram maiores valores de BAS

e altura do dossel que os plantios com menor adensamento (espaçamento 3x2 m) (Figura 2). O tratamento com maior número de indivíduos aparentemente pode aproveitar com maior eficiência a capacidade produtiva de sítio. Além disso, nos plantios mais adensados a BAS e altura do dossel não apresentaram diferença significativa entre os tratamentos de manejo tradicional e intensivo. Já para os plantios de menor adensamento, as estratégias de manejo apresentaram diferença significativa. Isso sugere que os plantios com maior adensamento proporcionaram maior sombreamento do mato competição no início do plantio, não alterando o combate moderado mecânico e intensivo químico sobre o mato competição. Além disso, a adubação intensiva não apresentou diferença da adubação moderada nos plantios mais adensados.

A alta relação dos resultados de BAS e altura do dossel se justifica devido a forte correlação de Pearson entre as duas variáveis ($r=0.86$, $p=0,001$). A maioria dos trabalhos que estimam a biomassa com variáveis Lidar utilizam variáveis relacionadas à altura do dossel como principal variável preditora, tanto em florestas primárias como em florestas em regeneração [9, 10].

A rugosidade do dossel também não apresentou diferença significativa (Figura 2), isso sugere que apesar de alguns tratamentos serem maiores que os outros, eles apresentam um dossel homogêneo horizontalmente, sem a presença de clareiras e copas emergentes. Contudo, os plantios mais adensados apresentaram uma maior variação na variável de rugosidade, tendo dosséis menos rugosos em algumas parcelas.

O IAF também não apresentou diferença significativa (Figura 2), mas também teve uma maior variação nos plantios mais adensados, devido a presença de parcelas com maiores IAF. Apesar do IAF não apresentar diferença significativa, a decomposição do IAF em DAF mostrou que a distribuição da vegetação se dá de maneira diferente ao longo do perfil vertical da floresta (Figura 3). Os plantios mais adensados apresentam maior densidade de vegetação acima dos 10 metros de altura. Já os plantios menos adensados apresentam maior DAF em 5 e 2 metros, respectivamente, para os manejos tradicional e intensivo. É possível observar que todos os tratamentos têm um perfil de DAF monomodal (semelhante a uma distribuição normal) com um maior acúmulo de vegetação a uma determinada altura do dossel. Isso deve ocorrer por se tratar de um plantio florestal relativamente jovem (2004-2018; 14 anos), onde a grande maioria dos indivíduos apresentam a mesma altura e consequentemente, maior acúmulo de vegetação em um determinado extrato vertical da floresta. Perfis de vegetação em florestas primárias apresentam perfis mais homogeneamente distribuídos ao longo do perfil vertical [8].

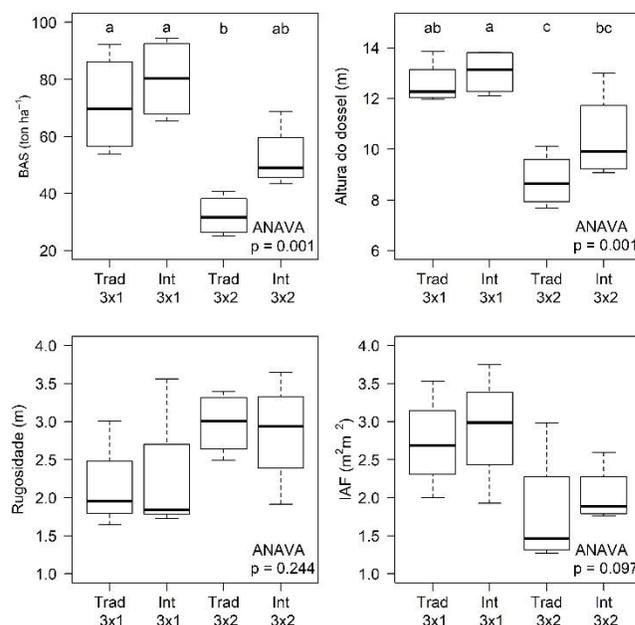


Figura 2. Boxplot das variáveis estruturais em relação aos tratamentos. Variáveis: BAS (Biomassa de madeira seca acima do solo), Altura do dossel, Rugosidade e IAF (índice de área foliar). Tratamentos: Combinação entre Trad e Int (manejo tradicional e intensivo) 3x1 e 3x2 (espaçamento de plantio). P-valor do teste de ANOVA e resultados *posthoc* Tukey-HSD (letras "abc").

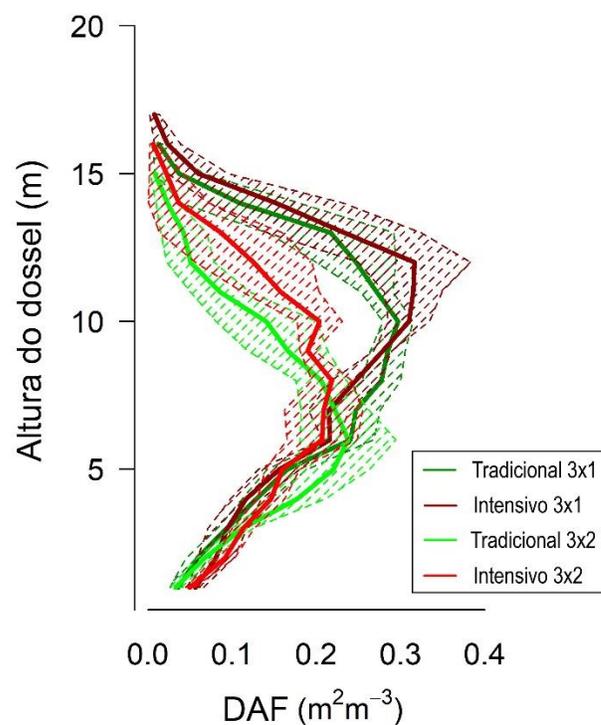


Figura 3. Perfil vertical da Densidade de Área Foliar (DAF) dos tratamentos.

4. CONCLUSÕES

Foi possível monitorar diferenças estruturais entre os tratamentos de restauração florestal ativa utilizando dados de campo e Lidar. A variável de campo BAS apresentou forte correlação com a variável Lidar altura do dossel. Nossos resultados sugerem que plantios mais adensados (espaçamento 3x1) podem ser mais adequados no caso de áreas com alto nível de mata competição. Apesar das variáveis estruturais apresentarem diferenças significativas entre os tratamentos, algumas características estruturais ainda são bastante similares devido ao fato de que todos os tratamentos ainda são plantios jovens, tendo a grande maioria de seus indivíduos com a mesma idade (14 anos) e portanto, com porte semelhante.

5. AGRADECIMENTOS

Danilo Almeida tem suporte do Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP #2016/05219-9).

6. REFERÊNCIAS

[1] Chazdon, R. L.; Brancalion, P. H. S.; Lamb, D.; Laestadius, L.; Calmon, M.; Kumar, C. A Policy-Driven Knowledge Agenda for Global Forest and Landscape Restoration. *Conserv. Lett.*, 10, 125–132, 2017.

[2] Brancalion, P. H. S.; Schweizer, D.; Gaudare, U.; Manguiera, J. R.; Lamonato, F.; Farah, F. T.; Nave, A. G.; Rodrigues, R. R. Balancing economic costs and ecological outcomes of passive and active restoration in agricultural landscapes: the case of Brazil. *Biotropica*, 48, 856–867, 2016.

[3] Campoe, O. C.; Stape, J. L.; Mendes, J. C. T. Can intensive management accelerate the restoration of Brazil's Atlantic forests? *For. Ecol. Manage.*, 2010.

[4] Ferez, A. P. C.; Campoe, O. C.; Mendes, J. C. T.; Stape, J. L. Silvicultural opportunities for increasing carbon stock in restoration of Atlantic forests in Brazil. *For. Ecol. Manage.*, 2015

[5] R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2017. URL <http://www.R-Project.org/>, R Foundation for Statistical Computing.

[6] M. Isenburg, "LAStools - efficient LiDAR processing software" (version 1.8, licensed), obtained from <http://rapidlasso.com/LAStools>

[7] MacArthur, R. H.; Horn, H. S. Foliage Profile by Vertical Measurements, *Ecology*, 50, 1969.

[8] Stark, S. C.; Leitold, V.; Wu, J. L.; Hunter, M. O.; de Castilho, C. V.; Costa, F. R. C.; McMahon, S. M.; Parker, G. G.; Shimabukuro, M. T.; Lefsky, M. A.; Keller, M.; Alves, L. F.; Schietti, J.; Shimabukuro, Y. E.; Brandão, D. O.; Woodcock, T. K.; Higuchi, N.; de Camargo, P. B.; de Oliveira, R. C.; Saleska, S. R. Amazon forest carbon dynamics predicted by profiles of canopy leaf area and light environment. *Ecol. Lett.*, 15, 1406–1414, 2012.

[9] 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.

[10] Becknell, J. M.; Keller, M.; Piotta, D.; Longo, M.; Nara dos-Santos, M.; Scaranello, M. A.; Bruno de Oliveira Cavalcante, R.; Porder, S. Landscape-scale lidar analysis of aboveground biomass distribution in secondary Brazilian Atlantic Forest. *Biotropica*, 2018.