

LiDAR terrestre para investigação de efeitos de borda e fragmentação florestal em atributos estruturais do dossel na Amazônia Central

Danilo Roberti Alves de Almeida ¹
Pedro Henrique Santin Brancalion ¹
Juliana Schietti de Almeida ²
Eric Bastos Görgens ³
Bruce Walker Nelson ²
Scott Christopher Stark ⁴
Diogo Martins Rosa ²
Aline Pontes Lopes ²
Nino Amazonas ¹
Thaiane Rodrigues de Sousa ²
Rafael Leandro de Assis ²
José Luis Campana Camargo ²

1 Universidade de São Paulo - USP/ESALQ
Caixa Postal 96 - 13416-000 - Piracicaba - SP, Brasil
{daniloflorestas, pedrobrancalion, namazonas}@gmail.com

2 Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA
Av. André Araujo, 2.936 – Petrópolis – CEP 69067 – 375 – Manaus – AM, Brasil
{jujuschietti, bnelsonbr, mrosa.diogo, alinepomes, zeluisacamargo}@gmail.com;
thaianefloresta@yahoo.com.br; rafa_assis@hotmail.com

3 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

4 Michigan State University - Department of Forestry,
East Lansing - MI - 48824 - USA
scott.c.stark@gmail.com

Abstract. We tested if structural changes in the canopy of *terra firme* forests in the Central Amazon caused by edge effects and fragmentation can be identified using rangefinder LiDAR. We compared forest fragment edge, fragment interior, and continuous forest in areas of the Biological Dynamics of Forest Fragments Project (BDFFP). We obtained the following canopy structural attributes: leaf area index, leaf area density in vertical profiles, canopy cover, height and rugosity of the upper canopy surface. These were derived from 100m long 2D profiles obtained with an upward-looking rangefinder LiDAR (Riegl LD90 - VHS3100 - FLP). The system (LiDAR, gimbal, computer and batteries) was carried by a field operator walking at a constant speed, using a metronome. The sensor was maintained 1m above the ground. Vegetation at the fragment edge had significantly lower canopy height and density understory compared to continuous forest. However, canopy cover and rugosity showed no significant difference. We concluded that LiDAR is a valuable tool, capable of identifying structural changes in the canopy caused by edge effects and fragmentation.

Palavras-chave: ground-LiDAR, forest structure, edge effects, LiDAR terrestre, estrutura florestal, efeito de borda.

1. Introdução

O desmatamento das florestas tropicais devido a mudanças no uso da terra tem modificado a paisagem amazônica, promovendo a formação de mosaicos de floresta contínua e fragmentos florestais, separados por matrizes de florestas secundárias e pastagens (Cochrane e Laurance 2002; Broadbent et al., 2008). Mudanças ecológicas devido a fragmentação florestal podem

estar relacionadas ao tamanho do fragmento, estes são conhecidos como efeitos de área, ou relacionadas a distância da borda, conhecido como efeito de borda (Laurance, 2011; Camargo e Kapos 1995).

O aumento do efeito de borda é uma das principais consequências da fragmentação florestal, causando alterações na dinâmica da vegetação de fragmentos (Lovejoy et al., 1986). Na matriz do entorno, como, por exemplo, uma pastagem, a transpiração das plantas e umidade do ar são menores, causando uma diferença de potencial atmosférico que favorece o fluxo de umidade de dentro para fora do fragmento (Camargo e Kapos 1995), possibilitando maior entrada de luz e penetração de ventos na borda para o interior do fragmento (Laurance, 2004) e também pode ser uma barreira para dispersores e polinizadores de espécies arbóreas (Jorge 2008, Dick et al., 2003). Esses efeitos causam a mortalidade de algumas espécies arbóreas típicas de condições de interior e favorecem espécies ruderais influenciando na estrutura da comunidade e no estoque de biomassa (Laurance et al., 2000, 2002, 2006).

Diversos estudos sobre o efeito de borda buscam entender esse complexo sistema e responder questões relacionadas à distância de penetração do efeito de borda (Brian et al., 2010) e às alterações resultantes na composição de espécies e estrutura da comunidade arbórea (Laurance 2006). Contudo, o estudo da estrutura da comunidade limita-se, normalmente, à análise da densidade de indivíduos em diferentes classes de diâmetro. Muitos atributos da estrutura física da vegetação, como altura média e rugosidade da superfície do dossel, densidade de clareiras, abertura de dossel, índice de área foliar e distribuição da vegetação ao longo do perfil vertical, são de difícil mensuração e normalmente utilizam métodos visuais de baixa precisão (Terborgh e Petren, 1991; Camargo e Kopes 1995).

Atualmente, é possível realizar mensurações e estimativas com alta precisão de importantes atributos estruturais da vegetação com o uso de sensoriamento remoto ativo do tipo LiDAR (Lefsky et al., 2002). A utilização do LiDAR para estudos florestais é relativamente nova, especialmente considerando-se florestas tropicais (Bergen et al., 2009). O LiDAR estima a distância de alvos (vegetação) a partir do tempo de emissão e retorno de pulsos laser no espectro do infravermelho próximo (~900nm). O produto final é uma nuvem de retornos 2D (LiDAR de perfil) ou 3D que pode ser utilizada para estimar diversos atributos estruturais. Alguns algoritmos recentes utilizam essa nuvem de retornos para estimar o índice de área foliar (IAF) e a densidade de área foliar (DAF) ao longo do perfil vertical (Parker et al., 2004; Stark et al., 2012; Almeida et al., 2016). Existem diferentes tipos de sistemas LiDAR quanto ao tipo de dados (discretos ou *full waveform*) e plataforma de coleta (avião, vant, terrestre fixa ou móvel). No presente trabalho, utilizamos um sistema com sensor LiDAR de perfil 2D, com plataforma terrestre portátil e alta densidade de retornos discretos. O objetivo deste trabalho foi testar a hipótese de que as alterações nos atributos estruturais da vegetação causadas pela fragmentação e efeito borda em uma floresta tropical da Amazônia central podem ser detectados por meio da tecnologia LiDAR.

2. Metodologia de Trabalho

2.1. Área de Estudo

As áreas de estudo fazem parte do maior e mais antigo estudo de monitoramento das consequências da fragmentação florestal (Lovejoy et al., 1986; Laurance et al., 2011); o Projeto Dinâmica Biológica de Fragmentos Florestais (PDBFF). Os sítios estão localizados nas fazendas “Dimona” e “Esteio”, na Amazônia central, no estado do Amazonas, Brasil, 80 km ao norte da cidade de Manaus (2°30' S, 60° O). A área possui vegetação do tipo florestas de terra-firme, e altitude variando entre 100-150 m, solos pobres em nutrientes e pluviosidade anual de 1900-2500 mm (Af, classificação Köppen).

Na fazenda Dimona, foram coletados dados em um fragmento florestal de 100 hectares, criado em 1984 onde a vegetação ao redor foi suprimida, com subsequente queima, limpeza e plantio de capim. O fragmento possui nove parcelas de 1 hectare (100 x 100 m), seis das quais possuem um dos lados ao limite da borda (parcelas a menos de 100 m da borda - tratamento Borda). As outras três parcelas do fragmento estão localizadas no centro do fragmento (tratamento Interior), distantes mais de 300 m da borda. Na fazenda Esteio, foram coletados dados em floresta primária contínua (tratamento Contínua), em nove parcelas de 1 hectare (100 x 100 m).

2.2. Coleta de dados

Os dados LiDAR foram coletados em julho de 2015. Em cada parcela, foram estabelecidas duas transecções lineares de 100 m distantes 40 m uma da outra. O sistema LiDAR portátil terrestre foi carregado por um operador em deslocamento horizontal a velocidade constante (0.33 m/s – controlada por um metrônomo) em uma plataforma terrestre com o sensor no sentido vertical ao zênite e visada para cima, mantido a um metro de altura do solo (Figura 1). O sensor LiDAR (Riegl LD90-VHS3100-FLP, Horn, Áustria) possui uma precisão de $\pm 25\text{mm}$ com alcance de até 200 m e registra 2.000 Hz de pulsos divididos em primeiros e últimos retornos.

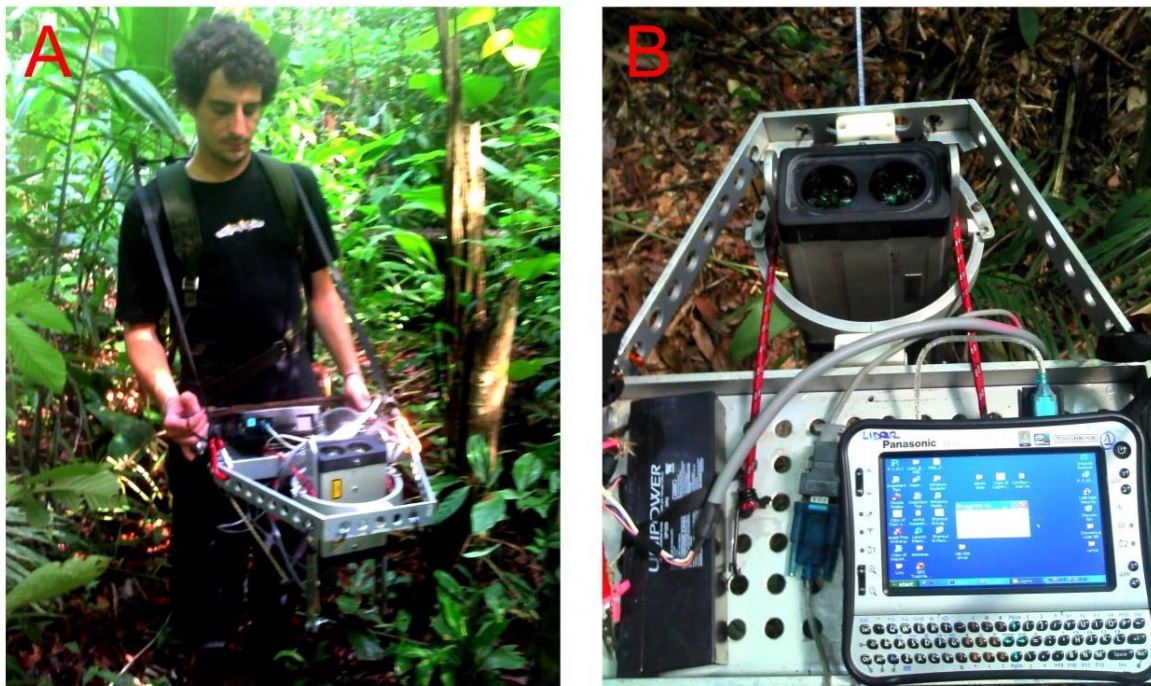


Figura 1 - (A) Sistema LiDAR-terrestre portátil com o operador. (B) Componentes do sistema: LiDAR fixo ao *gimbal* de alumínio (na parte superior central da imagem); bateria de 12v (parte inferior esquerda da imagem); computador (parte inferior direita da imagem). Mais detalhes no vídeo <<https://youtu.be/VGw8gIMGdJo>>

2.3. Variáveis estruturais e análises estatísticas

Para avaliar a diferença estrutural entre os tratamentos (i) borda do fragmento florestal (< 100 metros da borda), (ii) interior do fragmento (> 300 metros da borda) e (iii) floresta contínua, foram estimadas as seguintes variáveis estruturais:

- Índice da Área Foliar - IAF ($\text{m}^2.\text{m}^{-2}$): é a porção folha/solo, calculada a partir da soma do perfil de Densidade de Área Foliar (DAF).

- Densidade de Área Foliar - DAF ($m^2 \cdot m^{-3}$): é a decomposição do IAF e representa a quantidade de vegetação ao longo do perfil vertical da floresta. Com o DAF é possível calcular o IAF em diferentes estratos do perfil vertical. Os valores de DAF são estimados a partir da equação de MacArthur-Horn como descrito em Almeida et al. (2016);

- Altura máxima (m): é a altura máxima da superfície do dossel, estimada a partir do retorno mais alto em uma transecção de coleta LiDAR;

- Altura média (m): é a média da altura da superfície do dossel, calculada a partir da média de máximas alturas em colunas de 2 m (50 colunas) ao longo de cada transecção;

- Rugosidade (m): representa a heterogeneidade da superfície do dossel e é calculada a partir do desvio-padrão das máximas alturas de cada coluna de 2 m ao longo da transecção de dados LiDAR;

- *Gap fraction* (%): representa proporção de clareiras na vegetação. É calculada a partir da proporção de colunas que não possuem retornos acima de uma altura limítrofe. Aqui, foi utilizada a altura limítrofe de 15 metros;

- *Sky-shots* (%): são os pulsos que não retornam (vão para o céu) e representam a abertura de dossel.

Apesar de existirem dois transectos de 100 metros em cada parcela, os testes estatísticos foram feitos considerando a parcela, onde os valores de cada variável estrutural foram sumarizados pela média dos atributos nos dois transectos. Para cada variável estrutural, foram verificados os pressupostos de normalidade (teste de Shapiro) e homocedasticidade (teste de Bartlett) e, posteriormente, aplicado o teste de análise de variância (ANAVA) *posthoc* Tukey-HSD (*honestly significant difference*) contrastando os três tratamentos. O nível de significância adotado foi 0,05, porém, destacamos algumas “tendências” com significância entre 0,05-0,1 nos resultados. Todas as análises foram feitas no software R (R Core Team, 2016) e, para o teste Tukey-HSD, foi utilizado o pacote *agricolae* (Mendiburu, 2014).

3. Resultados e Discussão

Não houve diferença significativa no IAF total entre os três tratamentos (Tabela 1). Porém, a distribuição da vegetação ao longo dos estratos do perfil vertical foi diferente. No sub-bosque (< 5m), houve um gradiente crescente Borda-Interior-Contínua significativo no IAF do respectivo estrato. No estrato mediano, entre 5-25 m, o gradiente é invertido significativamente e depois é invertido novamente no estrato superior, acima de 25 m (Tabela 1).

Tabela 1. Médias e Desvios-padrão (DP) dos atributos estruturais do dossel derivados do LiDAR comparando os três tratamentos. P-valor do teste de ANAVA e resultados *posthoc* Tukey-HSD (letras “a” e “b” em negrito).

Atributo	Borda		Interior		Contínua		p-valor
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	
IAF total	5,72	0,36	5,79	0,35	5,88	0,43	0,757
IAF (< 5m)	0,64 b	0,06	0,70 ab	0,09	0,81 a	0,15	0,050*
IAF (5-25m)	4,30 a	0,38	3,80 ab	0,23	3,48 b	0,43	0,004*
IAF (> 25m)	0,77 b	0,30	1,29 ab	0,22	1,60 a	0,53	0,009*
Altura média	25,28 b	1,41	27,14 ab	0,81	28,04 a	2,10	0,031*
Altura máxima.	31,43	2,31	35,41	4,29	34,45	2,41	0,078'
Rugosidade	3,82	0,88	5,17	1,66	4,65	0,77	0,138
<i>Gap fraction</i>	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,971
<i>Sky-shots</i>	1,76	1,32	2,50	2,17	1,17	0,53	0,242

Significância: 0,05 (*); 0,10 (')

A altura média do dossel apresentou um gradiente crescente Borda-Interior-Contínua significativo. Os outros dois atributos de altura (altura máxima e rugosidade) não apresentaram diferenças significativas (Tabela 1). Porém, para as bordas há tendência de ser mais baixa (p -valor = 0,078). Esses resultados de menor altura e menor densidade de vegetação no estrato superior do dossel provavelmente são devidos à morte de indivíduos maiores e estabelecimento de espécies pioneiras de menor porte nas parcelas do fragmento e borda (Laurance et al., 2000, Laurance et al., 2006). Essas espécies pioneiras apresentam rápido crescimento; o que provavelmente justifica o menor IAF no sub-bosque e maior no estrato intermediário após mais de 30 anos de fragmentação.

Nós esperávamos que a abertura de dossel na borda do fragmento fosse maior devido a maior dinâmica de mortalidade e ingresso de indivíduos (Laurance et al., 2000, 2002). Contudo, os atributos de abertura de dossel (*Gap fraction* e *Sky-shots*) não apresentaram diferença significativa entre tratamentos. Isso provavelmente pode ser explicado porque a mortalidade de indivíduos na borda dos fragmentos, devido a alterações do microclima, pode vir a diminuir com o passar do tempo após fragmentação. Assim, as clareiras formadas neste período podem ser fechadas pelo rápido crescimento de espécies pioneiras e lianas (D'Angelo et al., 2004, Laurance et al., 2001).

4. Conclusão

O LiDAR terrestre foi capaz de identificar mudanças estruturais no dossel causado por efeitos de borda e fragmentação florestal.

Agradecimentos

Agradecemos a toda equipe do Projeto Dinâmica Biológica de Fragmentos Florestais (PDBFF) pelo apoio e financiamento das coletas de campo por meio do Edital de Auxílio-Pesquisa Thomas Lovejoy (2015); ao apoio do projeto “Como as florestas da Amazônia Central respondem às variações climáticas? Efeitos sobre dinâmica florestal e sinergia com a fragmentação florestal” (CNPq/ Edital LBA); à CAPES e à FAPESP (processo: 2016/05219-9) pelas bolsas de doutorado do primeiro autor. Este é o estudo 711 da Série Técnica do PDBFF.

Referências Bibliográficas

- Almeida, D. R. A. et al. Contrasting fire damage and fire susceptibility between seasonally flooded forest and upland forest in the Central Amazon using portable profiling LiDAR. **Remote Sensing of Environment**, v. 184, p. 153-160, 2016.
- Bergen, K. M. et al. Remote sensing of vegetation 3-D structure for biodiversity and habitat: Review and implications for lidar and radar spaceborne missions. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* (2005–2012), v. 114, n. G2, 2009.
- Briant, G. et al. Habitat fragmentation and the desiccation of forest canopies: a case study from eastern Amazonia. **Biological conservation**, v. 143, n. 11, p. 2763-2769, 2010.
- Broadbent, E. N. et al. Forest fragmentation and edge effects from deforestation and selective logging in the Brazilian Amazon. *Biological conservation*, v. 141, n. 7, p. 1745-1757, 2008.
- Camargo, J. L. C.; Kapos, V. Complex edge effects on soil moisture and microclimate in central Amazonian forest. **Journal of Tropical Ecology**, v. 11, n. 02, p. 205-221, 1995.
- Cochrane, M. A.; Laurance, W. F. Fire as a large-scale edge effect in Amazonian forests. *Journal of Tropical Ecology*, v. 18, n. 03, p. 311-325, 2002.
- D'Angelo, S. A. et al. Inferred causes of tree mortality in fragmented and intact Amazonian forests. **Journal of Tropical Ecology**, v. 20, n. 2, p. 243-246, 2004.

- Dick, C. W. et al. Pollen dispersal of tropical trees (*Dinizia excelsa*: Fabaceae) by native insects and African honeybees in pristine and fragmented Amazonian rainforest. **Molecular Ecology**, v. 12, n. 3, p. 753-764, 2003.
- Jorge, M. L. S. P. Effects of forest fragmentation on two sister genera of Amazonian rodents (*Myoprocta acouchy* and *Dasyprocta leporina*). **Biological Conservation**, v. 141, n. 3, p. 617-623, 2008.
- Laurance, W. F. et al. Conservation: rainforest fragmentation kills big trees. **Nature**, v. 404, n. 6780, p. 836-836, 2000.
- Laurance, W. F. Fragmentation and plant communities: synthesis and implications for landscape management. In: Bierregaard, R.O.; Gascon, C.; Lovejoy, T.E., Mesquita, R.C.G. (Eds.). **Lessons from Amazonia: the ecology and conservation of a fragmented forest**. Yale University Press, New Haven, Connecticut. 158-168, 2001.
- Laurance, W. F. et al. Rain forest fragmentation and the structure of Amazonian liana communities. **Ecology**, v. 82, n. 1, p. 105-116, 2001.
- Laurance, W. F. Hyperdynamism in fragmented habitats. **Journal of Vegetation Science**, v. 13, n. 4, p. 595-602, 2002.
- Laurance, W. F. Forest-climate interactions in fragmented tropical landscapes. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, v. 359, n. 1443, p. 345-352, 2004.
- Laurance, W. F. et al. Rain forest fragmentation and the proliferation of successional trees. **Ecology**, v. 87, n. 2, p. 469-482, 2006.
- Laurance, W. F. et al. The fate of Amazonian forest fragments: a 32-year investigation. **Biological Conservation**, v. 144, n. 1, p. 56-67, 2011.
- Lefsky, M. A. et al. Lidar Remote Sensing for Ecosystem Studies Lidar, an emerging remote sensing technology that directly measures the three-dimensional distribution of plant canopies, can accurately estimate vegetation structural attributes and should be of particular interest to forest, landscape, and global ecologists. **BioScience**, v. 52, n. 1, p. 19-30, 2002.
- Lovejoy, T. E. et al. Edge and other effects of isolation on Amazon forest fragments. 1986.
- Mendiburu, F. *Agricolae*: Statistical Procedures for Agricultural Research. R package version 1.2-1, 2014. <http://CRAN.R-project.org/package=agricolae>
- Parker, G. G. et al. A portable LIDAR system for rapid determination of forest canopy structure. **Journal of Applied Ecology**, v. 41, n. 4, p. 755-767, 2004.
- R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria., 2016. <http://www.R-project.org/>.
- Stark, S. C. et al. Amazon forest carbon dynamics predicted by profiles of canopy leaf area and light environment. **Ecology letters**, v. 15, n. 12, p. 1406-1414, 2012.
- Terborgh, J., Petren, K. Development of habitat structure through succession in an Amazonian floodplain forest. In: *Habitat structure*. Springer Netherlands, p. 28-46, 1991.