

Análises de susceptibilidade e impacto de incêndios florestais em uma floresta alagável (igapó) na Amazônia central por meio de lidar terrestre portátil.

Danilo Roberti Alves de Almeida 1

Bruce Walker Nelson 1

Juliana Schietti de Almeida 1

Eric Bastos Görgens 2

Angélica Faria de Resende 1

1 Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA
Av. André Araujo, 2.936 – Petrópolis – CEP 69067 – 375 – Manaus – AM, Brasil
{daniloflorestas, bnelsonbr, jujuschietti, gel.florestal}@gmail.com

2 Universidade de São Paulo - USP/ESALQ
Caixa Postal 96 - 13416-000 - Piracicaba - SP, Brasil
gorgens@usp.br

Abstract. Nutrient-poor and seasonally flooded Amazon forests have suffered high impacts from forest fires. During the dry periods, seasonally flooded forests can present higher air temperature and lower humidity compared to upland forests, enabling the occurrence and spread of fire. These microclimatic conditions may be related to structural attributes of the forest (canopy gap fraction, height and density of understory) that favor changing the microclimate. The aim of this study was to analyze these attributes to determine susceptibility and impacts of fires in these forests. To estimate these forest structure attributes we used a portable active remote sensing system equipped with LiDAR RIEGL LD90-3100VHS-FLP. The operation of the data collection in the field is quick and easy. Forest structural attributes are extracted from two-dimensional clouds of first or last returns at 2000 Hz. The 900 nm beam is strongly reflected by leaves. The instrument was mounted on a gimbal to maintain a zenith shot angle and it was carried 1m above the ground. Ten walks of 250m at a constant speed were made in each forest type: (1) unburned flooded forest (2) burned flooded forest (3) unburned upland forest and (4) burned upland forest. The flooded forest showed a major damage after fire and was also considered more susceptible to fire occurrence due to higher gap fraction (which increases the entry of sunlight), lower canopy height (what makes flooded forests more vulnerable to the external environment) and lower understory density (less alive and moist vegetation to contain the spread of fire).

Palavras-chave: remote sensing, laser scanner, leaf area density, sensoriamento remoto, laser de varredura, índice de área foliar.

1. Introdução

Os incêndios florestais na Amazônia causam danos à biodiversidade, pela morte de animais e plantas, à saúde da população próxima e também apresentam graves consequências para as mudanças climáticas globais, seja pela emissão de gases do efeito estufa como pela destruição das florestas responsáveis pelos equilíbrios hídricos e térmicos do planeta (Fearnside, 1990). A importância do fogo como um método barato de limpeza e condução de sistemas agrícolas faz com que a frequência das ocorrências de incêndios florestais seja alta, principalmente nos períodos sem chuva (Asner e Alencar, 2009). Felizmente as florestas altas e densas da Amazônia são resistentes à seca e bloqueiam o fogo, uma vez que seu interior sombreado e cheio de vegetação viva mantém o material combustível úmido (Uhl et al., 1988).

Contudo, florestas densas que já sofreram alteração estrutural pela exploração madeireira e/ou algum incêndio no passado são mais vulneráveis à ocorrência de novos incêndios florestais (Uhl e Kauffman, 1990; Woods, 1989). Isso se deve ao aumento do material combustível no solo e à alteração estrutural proporcionando uma maior entrada de iluminação solar no interior da floresta (Uhl e Kauffman, 1990), aumento da temperatura e diminuição da umidade relativa do ar, tornando o material combustível mais seco, com umidades menores que 65%, vulnerável

a ignição e proliferação do fogo (Uhl et al., 1988). As diversas fitofisionomias naturais da Amazônia possuem diferentes estruturas florestais, e assim, possuem também diferentes susceptibilidades e impactos aos incêndios (Uhl et al., 1988). Nelson (2001) observou, à partir de imagens de satélite (TM LandSat), maior impacto pós incêndio em florestas sazonalmente alagáveis por águas pretas pobres em nutrientes (igapó) em relação a terra-firme num local onde as duas fitofisionomias se encontravam próximas e foram penetradas pelo mesmo incêndio. Flores et al. (2014) utilizando inventário de campo e imagens de alta resolução encontrou uma mortalidade média de 90% de árvores em uma floresta de igapó no médio Rio Negro.

Mais de 11,5 % da bacia Amazônica é coberta por florestas sazonalmente alagáveis. Essas inundações dificultam o desenvolvimento da vegetação e causam períodos de dormência no crescimento da floresta (Worbes, 1997). Com isso é possível inferir que provavelmente as florestas de igapó sejam menos densas no sub-bosque, mais baixas e com maior abertura de dossel que florestas de terra-firme, resultando numa maior vulnerabilidade à alterações do seu microclima. A menor densidade de vegetação viva (úmida) no sub-bosque, é outro fator que facilita proliferação do fogo. Algumas florestas de igapó, no período em que estão secas, possuem menor umidade relativa do ar, maior temperatura (Resende *in press*) e maior acúmulo de material combustível no solo (Dos Santos e Nelson, 2013) do que florestas de terra-firme.

Os atributos estruturais que influenciam na dinâmica do microclima da floresta, tais como abertura de dossel, altura da floresta, densidade de área foliar (DAF) e o índice de área foliar (IAF) podem ser mensurados por técnicas de sensoriamento remoto ativo Laser Detection and Ranging (LiDAR) (Parker et al., 2004). A mensuração destes atributos é fundamental para determinar a susceptibilidade, dos diferentes tipos florestais, aos incêndios e também na mensuração de danos pós fogo. Esta tecnologia, mede a distância das estruturas em função do tempo percorrido entre a emissão e o retorno de raios laser, com comprimento no espectro do infravermelho próximo, que é altamente refletido pela vegetação (Lefsky et al., 2002).

O objetivo deste trabalho foi mensurar as diferenças estruturais de duas fitofisionomias (igapó e terra-firme) com um sistema de sensoriamento remoto ativo LiDAR terrestre portátil, para avaliar a susceptibilidade aos incêndios florestais e mensurar os danos pós incêndios em cada fitofisionomia.

2. Metodologia de Trabalho

2.1 Área de estudo

O estudo foi conduzido em uma área natural no município de Careiro Castanho, estado do Amazonas, Brasil, às margens do lago Mamori, com coordenadas geográficas 03°43' Sul e 60°14' Oeste, distante 102 quilômetros em linha reta, ao sul, de Manaus. O clima na região é tropical, quente e úmido, temperatura média de 27,2°C e pluviosidade média anual de 2.171mm. (Af, classificação Köppen).

As duas fitofisionomias avaliadas foram, (1) floresta alagável sazonalmente por águas pretas e ácidas (igapó) com um pulso anual e (2) floresta de terra-firme. Este estudo foi realizado em uma área natural e só foi possível devido à quatro aspectos do local. Primeiro, as duas fitofisionomias estão distribuídas de forma intercalada espacialmente onde os vales (locais mais baixos à beira dos corpos d'água) são florestas de igapó e os locais mais altos, florestas de terra-firme. Segundo, não existem escarpas ou solos sem vegetação entre as fitofisionomias, que poderiam funcionar como aceiros de contenção do fogo, portanto, a oportunidade de ignição e propagação do fogo foi igual entre os tipos florestais. Terceiro, a área amostrada possui cerca de 5 Km², assim florestas não queimadas foram utilizadas no estudo de susceptibilidade e também serviram de testemunha para os estudos de danos pós incêndios, partindo do princípio de que as áreas que sofreram incêndios eram semelhantes às que não sofreram. E por último, a região não possui histórico de incêndios e exploração florestal nas últimas décadas. As áreas

amostradas sofreram apenas um incêndio florestal em novembro/2009 onde parte das suas florestas foram queimadas. Este estudo foi conduzido 4 anos após o incêndio, tempo suficiente para todas as mortalidades pós incêndio ocorrerem (Barlow et al. 2003).

2.2 Coleta de dados

Foram amostradas 4 situações (1a) igapó não queimado, (1b) igapó queimado, (2a) terra-firme não queimada e (2b) terra-firme queimada, através de 10 transectos de 250 metros utilizando um sistema portátil equipado com LiDAR RIEGL modelo LD90-3100VHS-FLP (Horn, Austria), do tipo *rangefinder*. A distância entre o emissor e os objetos imageados é determinada à partir do tempo entre a emissão e retorno do feixe laser, produzindo uma nuvem de retornos bidimensionais. Seu pulso é de 900 nm, que é fortemente refletido pela vegetação. Com precisão de +/- 25 mm e *range* nominal de 200m sem retrorrefletor, o equipamento registra o primeiro e o último retorno, com uma frequência de 2000 Hz. Os pulsos que não atingem algum alvo, são chamados de *skyshots*.

O sistema LiDAR portátil terrestre (LPT) é de fácil manuseio e custa em torno de ~US\$ 22.000,00. Para as coletas em campo, ele foi fixado com visada vertical (ao zênite), em um *gimbal* portátil e mantido à um metro acima do chão. Todo sistema (LiDAR, *gimbal*, bateria e computador) é carregado por um operador em deslocamento horizontal e em velocidade constante. Com treinamento e com o auxílio de um metrônomo sonoro, foi possível manter a velocidade de movimento horizontal com erro inferior a 5%. A localização no espaço foi feita por georreferenciamento do transecto.

2.3 Atributos estruturais e métricas

Para avaliar a susceptibilidade à ocorrência de incêndios e danos pós incêndio rasteiro entre as duas fitofisionomias foram investigados os atributos (i) densidade de área foliar inferior (~1-5 metros de altura), (ii) altura média do dossel superior e (iii) abertura do dossel superior.

Estes atributos foram investigados à partir das métricas de densidade de área foliar (DAF) (ao longo de todo o perfil vertical da floresta em intervalos de 1 metro), índice de área foliar (IAF), média das alturas do dossel superior (médias de 250 alturas em cada transecto em intervalos de 1 metro), fração abertura de dossel (fração da distância horizontal em metros sem vegetação acima de 15 metros de altura pela distância total do transecto de 250 metros) e da porcentagem de *skyshots* (pulsos que ultrapassam todo o dossel da floresta e não retornam ao sensor). Foi utilizado o teste Mann-Whitney para testar as diferenças entre as situações.

Para estimativa do perfil DAF e o IAF foi utilizado o método MacArthur-Horn (1):

$$DAF_{i,j} = \ln(\text{retornos/pulsos totais}) \times \Delta h \quad (1)$$

Onde o *DAF* é a densidade de área foliar (*i* é a classe de altura da vegetação (por exemplo entre 1-2 metros, 2-3 metros...), e o *j* é o transecto), *retornos* é o número de retornos obtidos para aquela classe de altura, *pulsos totais* é o número de pulsos que entraram na classe de altura e o Δh é o tamanho da classe, que neste trabalho o cálculo do *DAF* foi estimado a cada um metro ($\Delta h = 1$). Portanto para cada altura é estimado um respectivo *DAF*. O *IAF* é obtido pela soma de todos os *DAF* dentro de um transecto (2):

$$IAF_j = \sum DAF_{i,j} \quad (2)$$

Onde o *IAF_j* é o índice de área foliar do transecto *j*.

3. Resultados e discussão

3.1 Susceptibilidade

O IAF da terra-firme não queimada e do igapó não queimado (Figura 1), 6,1 e 6,0 respectivamente, não apresentaram diferença significativa ($p = 0,85$). Porém a floresta de terra-firme possui maior densidade de vegetação no sub-bosque, até os 4 metros de altura ($p = 0,002$) (Figura 1).

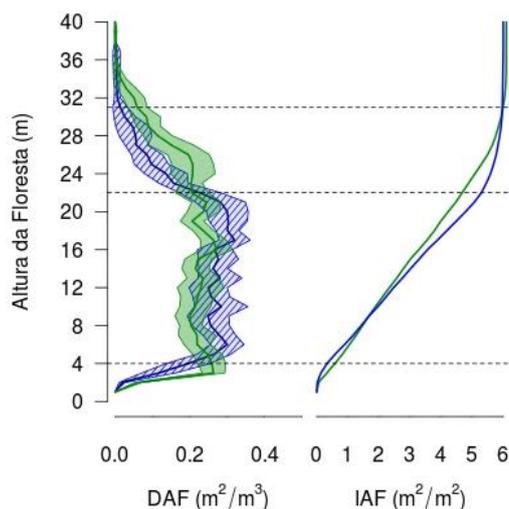


Figura 1. Densidade de vegetação (com intervalo de confiança) ao longo do perfil vertical e o IAF acumulado das áreas de igapó não queimado (azul) e terra-firme não queimada (verde). As linhas tracejadas indicam alturas (primeira e segunda linha, 4 e 22 metros, respectivamente) de inversão na densidade de vegetação e a altura (terceira linha, 31 metros) onde o IAF total do igapó é atingido.

Esta vegetação baixa, verde e úmida dificulta a propagação de incêndios rasteiros e contribui para o equilíbrio da temperatura e da umidade relativa do ar dentro da floresta. Dos 4 aos 22 metros de altura a floresta de igapó é mais densa ($p = 0,004$), igualando o valor do IAF acumulado aos 8 metros (p -valor = 0,734). Acima dos 22 metros a terra-firme possui maior densidade de vegetação ($p = 0,004$) e aos 31 metros o IAF acumulado se iguala novamente ($p = 0,85$). Acima desta altura somente a terra-firme apresentou acréscimo no IAF ($p = 0,009$). A floresta de igapó é 15% mais baixa que a floresta de terra-firme ($p < 0,001$) (Figura 2).

ao longo de todo o perfil vertical da floresta de igapó enquanto que na terra-firme houve um aumento de 29% da vegetação até os 9 metros de altura ($p = 0,03$) e posteriormente uma perda de 26% da vegetação acima dos 12 metros ($p < 0,001$), sendo que aos 22 metros a terra-firme não queimada alcançou e ultrapassou o valor de IAF acumulado da terra-firme queimada (Figura 5). Esse aumento de vegetação do sub-bosque na terra-firme deve-se à maior abertura de dossel causada pelo incêndio favorecendo o desenvolvimento o crescimento da vegetação nos níveis inferiores da floresta.

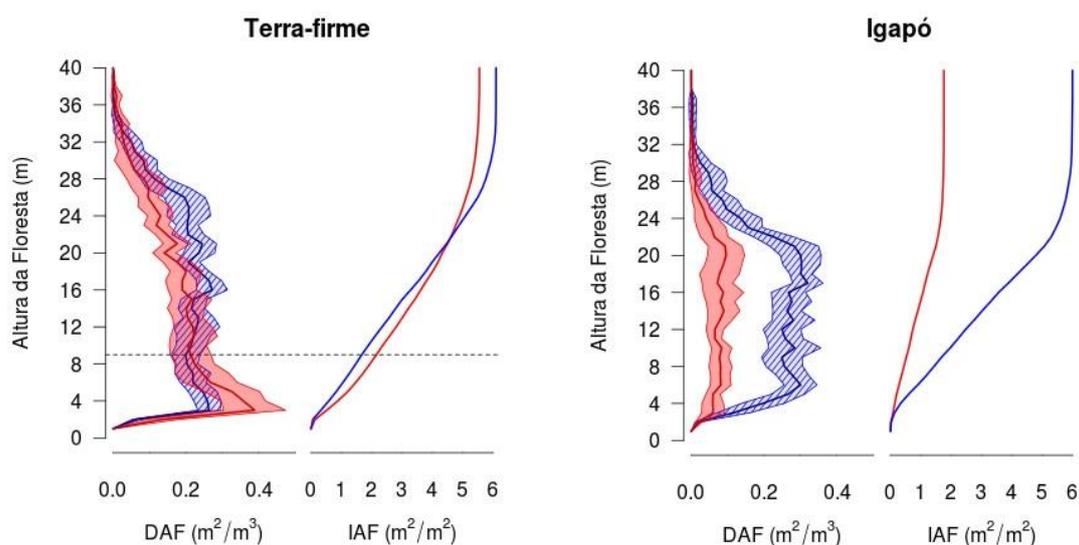


Figura 5. Densidade de área foliar (com intervalo de confiança) ao longo do perfil vertical e o somatório do IAF das áreas de terra-firme e igapó não queimados (azul) e queimados (vermelho). A linha tracejada indica a altura (9 metros) onde a densidade de vegetação inverte entre as situações da terra-firme.

Houve uma diminuição na altura média em 12% (Figura 1) na floresta de terra-firme ($p = 0,007$) e 43% no igapó ($p < 0,001$). A abertura de dossel aumentou na terra-firme com o dobro de *skycshots* ($p < 0,001$) e 2,5 vezes maior fração de abertura de dossel ($p = 0,002$). No igapó esse aumento foi ainda maior com quase 14 vezes mais *skycshots* e 3 vezes mais fração abertura de dossel (Figuras 3 e 4).

4. Conclusão

A estrutura da floresta de igapó a torna mais susceptível a ocorrência de incêndios. A abertura de dossel e a altura baixa da floresta propiciam alteração do seu micro clima. Além disso a ausência de uma vegetação densa e úmida no sub-bosque favorece a propagação do fogo. Isso é preocupante porque além desta susceptibilidade, os danos causados pelos incêndios são muito mais graves no igapó. Na terra-firme os danos não foram tão drásticos, a umidade dentro da floresta fez com que o fogo não fosse tão destrutivo como no igapó.

Agradecimentos

Ao suporte financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Referências bibliográficas

Asner, G. P.; Alencar, A. Drought impacts on the Amazon forest: the remote sensing perspective. *New Phytologist*, v. 187, n. 3, p. 569-578, 2010.

Dos Santos, A. R.; B. W. Nelson. Leaf Decomposition and Fine Fuels in Floodplain Forests of the Rio Negro in the Brazilian Amazon. **Journal of Tropical Ecology**. n. 29: p. 455-458. 2013.

Fearnside, P. M. Deforestation in Brazilian Amazonia: history, rates, and consequences. **Conservation biology**, v. 19, n. 3, p. 680-688, 2005.

Flores, B. M., M. T. F. Piedade, B. W. Nelson. Fire disturbance in Amazonian blackwater floodplain forests. **Plant Ecology and Diversity** (doi: 10.1080/17550874.2012.716086). 2012.

Lefsky, M. A.; Cohen, W. B.; Parker, G. G.; Harding, D. J. 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.

Nelson, W. B. Fogo em Florestas da Amazônia Central em 1997. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Anais X SBSR, Foz de Iguaçu, p. 1675 - 1682, 2001. Available in: <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2001/oral/246.pdf> visited in 27 august 2014.

Parker, G. G.; Harding, D. J.; Berger, M. L. A portable LIDAR system for rapid determination of forest canopy structure. **Journal of Applied Ecology**, v. 41, n. 4, p. 755-767, 2004.

Resende, A. F., Nelson, B. W., Flores, B. M. and Almeida, D. R. A. Fire Damage in Seasonally Flooded and Upland Forests of the Central Amazon. **Biotropica**. (In press)

Uhl, C.; Kauffman J. B.; Cummings, D. L. Fire in the Venezuelan Amazon 2: environmental conditions necessary for forest fires in the evergreen rainforest of Venezuela. **Oikos**, p. 176-184, 1988.

Uhl, C.; KAUFFMAN, J. B. Deforestation, fire susceptibility, and potential tree responses to fire in the eastern Amazon. **Ecology**, v. 71, n. 2, p. 437-449, 1990.

Worbes, M. The forest ecosystem of the floodplains. In Junk W. J. **The Central Amazon floodplain**. Springer Berlin Heidelberg, 1997. cap. 11, p. 223-266.