

## DINÂMICA DO FOGO EM BORDAS FLORESTAIS NO SUL DA BACIA AMAZÔNICA

Celso H. L. Silva Junior<sup>1</sup>, Luiz E. O. C. Aragão<sup>1</sup>, Liana O. Anderson<sup>2</sup>, Thales V. Penha<sup>1</sup>, Mikhaela A. J. S. Pletsch<sup>1</sup>, Ana C. M. Pessoa<sup>1</sup>, Marisa G. Fonseca<sup>1</sup>, Sonaira S. Silva<sup>3</sup> e Izaya Numata<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. Av. dos Astronautas, 1.758 - Jardim da Granja, São José dos Campos - SP, Brasil, 12227-010. E-mail: {celso.junior, luiz.aragao, thales.penha, mikhaela.pletsch, ana.pessoa, marisa.fonseca}@inpe.br; <sup>2</sup>Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais - CEMADEN. Estrada Doutor Altino Bondensan, 500 - Parque Tecnológico de São José dos Campos, São José dos Campos - SP, Brasil, 12247-016. E-mail: liana.anderson@cemaden.gov.br; <sup>3</sup>Universidade Federal do Acre - UFAC. Caixa Postal 96, Rio Branco - AC, Brasil, 13416-000. E-mail: sonairasilva@gmail.com; <sup>4</sup>South Dakota State University - SDSU. Box 506B, Brookings - SD, USA, 57007. E-mail: Izaya.Numata@sdstate.edu

### ABSTRACT

*Deforestation-induced fragmentation has increased forest edges in Amazon forests. However, the dynamics of fires in these fragmented forest areas is poorly known in this region. To fill this gap, our work aimed to analyse the dynamics of fire in the forest edges in the South of the Amazon Basin. To achieve the proposed aim, we used a remote sensing derived dataset, composed with forest cover, land-use and land-cover, and burned areas. Our results showed that during the 2010 extreme drought, fire penetrability into the forest was maximized, impacting areas far from forest edges. The burned areas were found predominantly in edges older than 13 years. Fire presented greater recurrence rates at the edges than those inside the forest. The ignition sources at forest edges were mainly from adjacent pasture areas. Finally, we conclude that due the dynamics of fire at the forest edges revealed here the carbon stock loss may increase in these fragmented landscapes, contributing to the increase of regional carbon emissions from the Amazon Basin.*

**Key words** — Fragmentation, MODIS, Edge Effect, TerraClass, Deforestation.

### 1. INTRODUÇÃO

Na Amazônia, o desmatamento altera a disposição espacial e o tamanho dos remanescentes florestais, como consequência da fragmentação, que é observada por meio do aumento das áreas de bordas e do número de fragmentos [1], causando efeitos negativos como a redução da biodiversidade, aumento da suscetibilidade da floresta ao fogo e redução do estoque de carbono florestal [2].

Até 100m de distância das bordas florestais criadas há quatro anos, Laurance et al. [3] encontraram uma perda significativa de 10,6% nos estoques de carbono. Essa perda foi associada às alterações no microclima e a maior ação dos ventos que aumentaram a mortalidade das árvores [3]. Entretanto, essa mortalidade pode ser intensificada pela ação do fogo, principalmente em áreas onde são abundantes as fontes de ignição, como a região sul da Bacia Amazônica e em anos de secas extremas [3–5].

Assim, o presente trabalho teve como objetivo, analisar a dinâmica do fogo em bordas florestais na região Sul da Bacia Amazônica. Para atingir esse objetivo, propomos responder às seguintes perguntas: (1) Secas extremas alteram a penetrabilidade do fogo nas florestas? (2) Qual a idade da borda mais susceptível ao fogo? (3) O fogo é mais recorrente em bordas florestais ou no interior da floresta? (4) Qual a origem das fontes de ignição nas bordas florestais onde o fogo é recorrente?

### 2. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo (Figura 1) contempla a porção Sul da Bacia Amazônica no Norte do estado de Mato Grosso, perfazendo uma área total de 491.226 km<sup>2</sup> (54% da área total do estado). Devido à variabilidade climática e de relevo, essa região possui uma biodiversidade complexa, compreendendo dois biomas brasileiros, a Amazônia e o Cerrado [6]. A vegetação nessa região varia entre áreas de savanas e campos naturais no Cerrado até densas florestas perenes e decíduas na Amazônia [7].

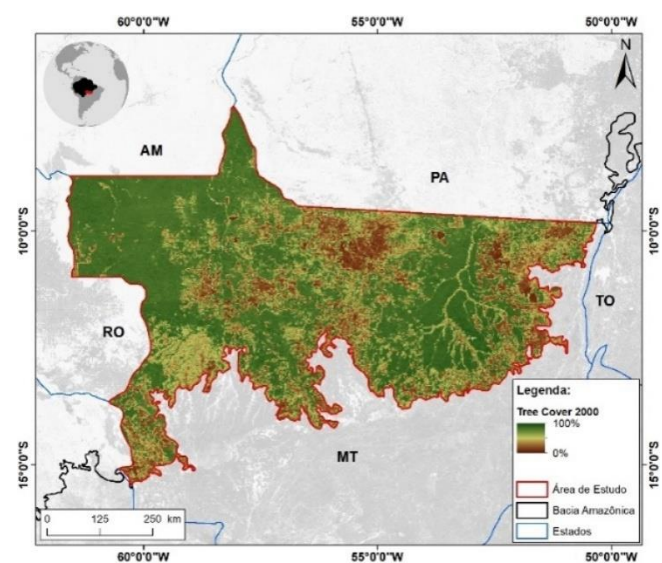


Figura 1. Localização da área de estudo (polígono vermelho). O dado Tree Cover 2000 representa a porcentagem da cobertura de vegetação [8].

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Dados

Os mapas anuais de cobertura florestal (2000-2013) em 30m de resolução espacial foram elaborados por Silva Junior [9] a partir dos dados de Hansen et al. [10]. Um limiar de 80% para a cobertura de vegetação foi utilizado para definir as áreas de floresta [9].

Os mapas de uso e cobertura da terra em resolução de 30m foram obtidos por meio do Projeto TerraClass/INPE [11] na escala bianual (2008, 2010 e 2012). As principais classes mapeadas são: agricultura, pasto e vegetação secundária.

Os mapas de áreas queimadas foram elaborados na escala anual (2007-2013) em resolução espacial de 250m pelo grupo TREES/INPE [12]. Este mapeamento segue a metodologia descrita no trabalho de Anderson et al. [12], o qual é baseado na aplicação do modelo linear de mistura espectral em imagens de superfície de reflectância do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), classificação não supervisionada e posterior edição por especialista.

### 2.2. Métodos

Centramos todas as nossas análises na seca extrema de 2010 [5], compreendendo o intervalo temporal de 2007 a 2013.

Os dados de áreas queimadas foram reamostrados da resolução espacial original em 250m para a resolução espacial de 30m por meio do método “vizinho mais próximo”, com o objetivo de torná-lo compatível com os demais dados.

A identificação das bordas florestais foi realizada pelo cálculo da distância euclidiana a partir da classe de não-floresta em direção à classe de floresta para todos os dados de cobertura de floresta. Em seguida, classificamos as distâncias euclidianas em três classes: não-floresta (igual a 0m), bordas (entre 30 e 120m) e floresta (maior que 120m). A profundidade de borda de 120m foi baseada no trabalho de Laurance et al. [3].

Para obter a recorrência de fogo nas bordas florestais, atribuímos o valor “1” para as áreas queimadas, que posteriormente foram somadas ano a ano utilizando a técnica de álgebra de mapas. Posteriormente, as recorrências foram separadas em áreas de borda e interior da floresta, com o objetivo de analisá-las separadamente.

Para calcular a idade das bordas florestais, utilizamos a metodologia descrita anteriormente para produzir mapas anuais de idade das bordas entre 2001 e 2013 que foram sobrepostos aos mapas de áreas queimadas. Não consideramos as bordas do ano de 2000, pois não seria possível a estimativa de suas idades [13].

Por fim, para analisar as fontes de ignição, calculamos a distância euclidiana entre as bordas com recorrência igual ou

superior a dois anos e as classes de uso e cobertura da terra. Posteriormente quantificamos as áreas de recorrência que estavam a pelo menos 1000m [4] das áreas de pasto, de agricultura, ou ambos.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 2, apresentamos o total de áreas queimadas em cobertura de florestas para os anos analisados, quantificadas por intervalos de distância da borda. Observamos que em média  $60 \pm 10\%$  ano<sup>-1</sup> ( $1043 \pm 946$  km<sup>2</sup> ano<sup>-1</sup>) das áreas queimadas foram encontradas nos primeiros 120m a partir das bordas em anos normais. Por outro lado, em 2010, em que ocorreu uma seca extrema na região, foram observados 4991 km<sup>2</sup> de áreas queimadas nas bordas de até 120m, representando uma proporção de 46% das áreas queimadas de 2010 (10.812 km<sup>2</sup>). Nas áreas de florestas com distância superior a 600m da borda, encontramos em média  $72 \pm 83$  km<sup>2</sup> ano<sup>-1</sup> ( $4 \pm 4\%$  ano<sup>-1</sup> da área total queimada em cada ano) de áreas queimadas em anos normais. Em 2010, encontramos 942 km<sup>2</sup> (9%) para a distância da borda maior que 600m, área 13,1 vezes maior que a média nos anos normais (sem secas severas).

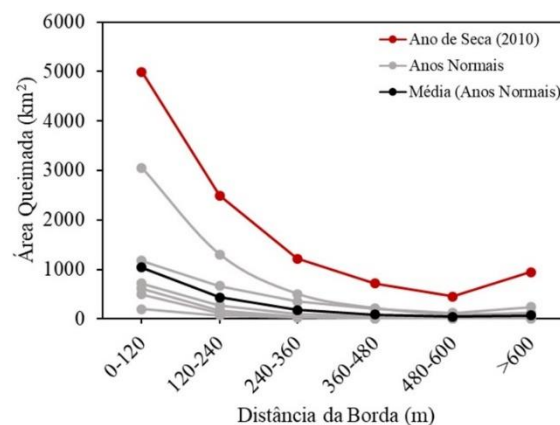


Figura 2. Distribuição das áreas de queimadas em cobertura de floresta por classe de distância da borda.

A maior proporção de áreas queimadas nos primeiros 120m a partir das bordas nos anos normais, é resultado de alterações adversas dos gradientes ambientais, como a luz, temperatura, vento e umidade [14], que predispõem a floresta ao fogo. Entretanto, em anos de seca severas, devido ao estresse hídrico, disponibilidade de combustível, como a serapilheira e árvores mortas, e maiores temperaturas [5, 15], ocorre o aumento da suscetibilidade da floresta ao fogo em regiões mais distantes das bordas, explicando a maior penetrabilidade do fogo no interior da floresta. Esses resultados corroboram trabalhos anteriores que encontraram aumento significativo de áreas de floresta queimadas durante eventos de secas extremas [5, 16].

Além disso, a idade das bordas florestais pode também influenciar a ocorrência do fogo em bordas florestais. Na Figura 3, apresentamos as áreas queimadas em bordas

florestais (até 120m), classificadas por suas respectivas idades. Descobrimos que a maior proporção de áreas queimadas ocorreu em bordas com idade superior a 13 anos, variando entre 37% (462 km<sup>2</sup>) em 2008 e 58% (3052 km<sup>2</sup>) em 2010. Bordas com idade entre 5 e 13 anos apresentaram proporção variando entre 13% (413 km<sup>2</sup>) em 2007 e 29% (185 km<sup>2</sup>) em 2013. No entanto, as bordas de um ano (bordas criadas no mesmo ano analisado) apresentaram proporções variando entre 7% (14 km<sup>2</sup>) em 2010 e 20% (148 km<sup>2</sup>) em 2011.

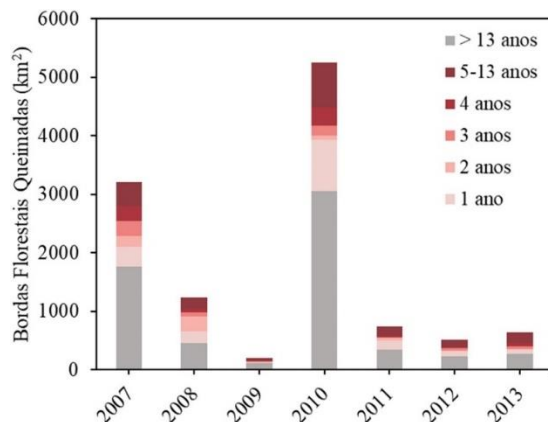


Figura 3. Quantificação das áreas queimadas em bordas florestais por classes de idade.

Sabendo que áreas queimadas são observadas predominantemente até 120m das bordas florestais e apresentam uma relação direta com bordas mais antigas, na Figura 4, quantificamos a recorrência de áreas queimadas nas bordas florestais (até 120m) e no interior da floresta. Identificamos a predominância de áreas queimadas uma única vez nas bordas e interior da floresta, totalizando 6361 km<sup>2</sup> (79%) e 6305 km<sup>2</sup> (91%), respectivamente. Embora em menor magnitude, as recorrências superiores a duas vezes foram dominantes nas bordas florestais, totalizando 348 km<sup>2</sup>, ao mesmo tempo que o interior da floresta apresentou um total de 69 km<sup>2</sup>.

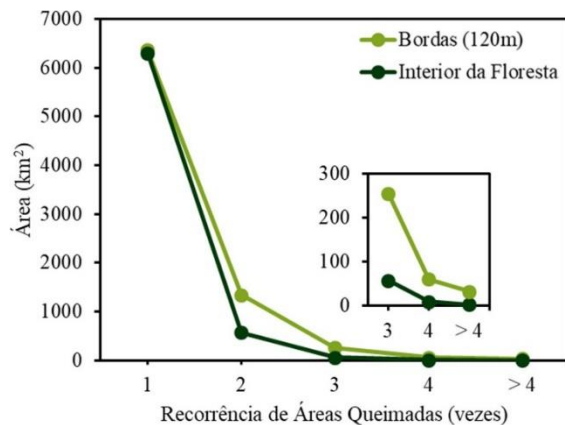


Figura 4. Quantificação da recorrência de áreas queimadas nas bordas florestais e no interior da floresta entre 2007 e 2013.

A partir dos resultados apresentados anteriormente na Figura 3, sugerimos que as bordas florestais estão sujeitas a perda do estoque de carbono, não somente devido a mortalidade de árvores por alteração no microclima e ação dos ventos [3], mas também através da mortalidade de árvores pela ação direta do fogo [17]. Isso é crítico, uma vez que as florestas amazônicas impactadas pelo fogo não conseguem recuperar a quantidade original dos estoques de carbono, mesmo após 31 anos da degradação [18].

A ocorrência e recorrência de áreas queimadas nas bordas florestais é condicionada ainda pela disponibilidade de fontes de ignição. Na Figura 5, quantificamos as áreas queimadas em bordas florestais que apresentaram recorrência igual ou maior a duas vezes, que estavam à pelo menos 1000m das demais classes de uso e cobertura da terra. Observamos que uma proporção média de 63±4% (681±333 km<sup>2</sup>) das bordas analisadas estava associada a fontes de ignição vindas de áreas de pasto, enquanto 1.3±0.3% (12±5 km<sup>2</sup>) dessas bordas estavam associadas às áreas de agricultura. Por outro lado, uma proporção média de 31±3% (322±153 km<sup>2</sup>) das áreas de recorrência de áreas queimadas estavam associadas a outros tipos de uso e cobertura da terra, como vegetação secundária, área recentemente desmatada ou áreas urbanas.

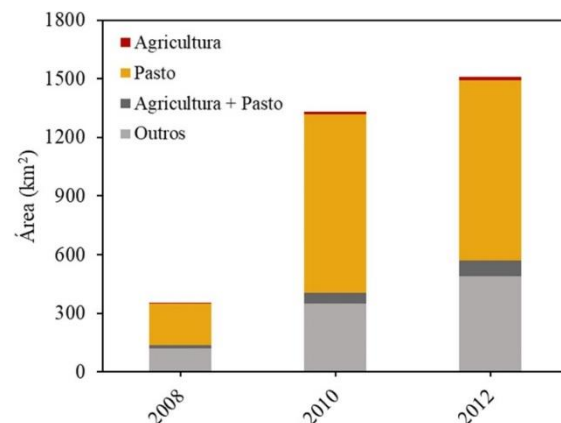


Figura 5. Área das bordas florestais com recorrência de fogo igual ou superior a duas vezes a pelo menos 1000m das áreas de agricultura e pasto.

A maior contribuição das áreas de pasto para a ocorrência de fogo nas bordas florestais encontrada na Figura 5 corrobora os resultados encontrados anteriormente para diferentes regiões da Amazônia [4, 19]. Por outro lado, a menor contribuição das áreas agrícolas pode ser explicada pela mecanização do cultivo que não utiliza o fogo como forma de manejo [20].

## 5. CONCLUSÕES

Concluimos que durante secas extremas, a penetrabilidade do fogo na floresta é maximizada, degradando áreas distantes das bordas florestais. As áreas queimadas são predominantes em bordas com idade superior a 13 anos. O fogo apresenta



maior recorrência nas bordas que no interior da floresta. As fontes de ignição em sua maioria são de origem nas áreas de pasto.

Elaboramos duas hipóteses para explicar a maior ocorrência de áreas queimadas em bordas mais antigas: (1) a proporção de borda com idade superior a 13 anos é maior que as bordas mais novas, explicando a maior ocorrência de fogo, ou (2) bordas mais antigas são mais degradadas, e consequentemente mais suscetíveis ao fogo. Trabalhos futuros poderão testar as duas hipóteses propostas.

Por fim, nossos resultados sugerem que a dinâmica do fogo nas bordas florestais identificada no presente trabalho pode elevar a perda de estoques de carbono identificada em estudos anteriores [3], aumentando assim a contribuição das bordas florestais para as emissões atmosféricas de carbono na Amazônia [13].

## 6. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Marisa G. Fonseca agradece a CAPES pela bolsa de pós-doutorado cedida. Os autores agradecem também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) - Processos: 305054/2016-3, 309247/2016-0, 140377/2018-2 e 140877/2018-5.

## 7. REFERÊNCIAS

- [1] Silva Junior, C.; Aragão, L.; Fonseca, M.; Almeida, C.; Vedovato, L.; and Anderson, L., "Deforestation-Induced Fragmentation Increases Forest Fire Occurrence in Central Brazilian Amazonia," *Forests*, vol. 9, no. 6, p. 305, Jun. 2018.
- [2] Laurance, W. F. *et al.*, "An Amazonian rainforest and its fragments as a laboratory of global change," *Biol. Rev.*, May 2017.
- [3] Laurance, W. F.; Laurance, S. G.; and Delamonica, P., "Tropical forest fragmentation and greenhouse gas emissions," *For. Ecol. Manage.*, vol. 110, no. 1–3, pp. 173–180, Oct. 1998.
- [4] Cano-Crespo, A.; Oliveira, P. J. C.; Boit, A.; Cardoso, M.; and Thonicke, K., "Forest edge burning in the Brazilian Amazon promoted by escaping fires from managed pastures," *J. Geophys. Res. Biogeosciences*, vol. 120, no. 10, pp. 2095–2107, Oct. 2015.
- [5] Aragão, L. E. O. C. *et al.*, "21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions," *Nat. Commun.*, vol. 9, no. 1, p. 536, Dec. 2018.
- [6] Shimabukuro, Y. E.; Miettinen, J.; Beuchle, R.; Grecchi, R. C.; Simonetti, D.; and Achard, F., "Estimating Burned Area in Mato Grosso, Brazil, Using an Object-Based Classification Method on a Systematic Sample of Medium Resolution Satellite Images," *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, vol. 8, no. 9, pp. 4502–4508, Sep. 2015.
- [7] Miettinen, J. *et al.*, "On the extent of fire-induced forest degradation in Mato Grosso, Brazilian Amazon, in 2000, 2005 and 2010," *Int. J. Wildl. Fire*, vol. 25, no. 2, p. 129, 2016.
- [8] Hansen, M. C.; DeFries, R. S.; Townshend, J. R. G.; Carroll, M.; Dimiceli, C.; and Sohlberg, R. A., "Global Percent Tree Cover at a Spatial Resolution of 500 Meters: First Results of the MODIS Vegetation Continuous Fields Algorithm," *Earth Interact.*, vol. 7, no. 10, pp. 1–15, Oct. 2003.
- [9] Silva Junior, C. H. L., "Dinâmica da formação de bordas florestais e seu impacto nos estoques de carbono na Bacia Amazônica utilizando sensoriamento remoto," Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, 2018.
- [10] Hansen, M. C. *et al.*, "High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change," *Science (80-. )*, vol. 342, no. 6160, pp. 850–853, Nov. 2013.
- [11] Almeida, C. A. de *et al.*, "High spatial resolution land use and land cover mapping of the Brazilian Legal Amazon in 2008 using Landsat-5/TM and MODIS data," *Acta Amaz.*, vol. 46, no. 3, pp. 291–302, Sep. 2016.
- [12] Anderson, L. O. *et al.*, "Disentangling the contribution of multiple land covers to fire-mediated carbon emissions in Amazonia during the 2010 drought," *Global Biogeochem. Cycles*, vol. 29, no. 10, pp. 1739–1753, Oct. 2015.
- [13] Numata, I.; Cochrane, M. A.; Souza Jr, C. M.; and Sales, M. H., "Carbon emissions from deforestation and forest fragmentation in the Brazilian Amazon," *Environ. Res. Lett.*, vol. 6, no. 4, p. 044003, Oct. 2011.
- [14] Broadbent, E. N.; Asner, G. P.; Oliveira, P. J. C.; Knapp, D. E.; Keller, M.; and Silva, J. N., "Forest fragmentation and edge effects from deforestation and selective logging in the Brazilian Amazon," *Biol. Conserv.*, vol. 141, no. 7, pp. 1745–1757, Jul. 2008.
- [15] Aragão, L. E. O. C. *et al.*, "Environmental change and the carbon balance of Amazonian forests," *Biol. Rev.*, vol. 89, no. 4, pp. 913–931, Nov. 2014.
- [16] Silva, S. S. da; Fearnside, P. M.; Graça, P. M. L. de A.; Brown, I. F.; Alencar, A.; and Melo, A. W. F. de, "Dynamics of forest fires in the southwestern Amazon," *For. Ecol. Manage.*, vol. 424, pp. 312–322, Sep. 2018.
- [17] Brando, P. M. *et al.*, "Abrupt increases in Amazonian tree mortality due to drought-fire interactions," *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 111, no. 17, pp. 6347–6352, Apr. 2014.
- [18] Silva, C. V. J. *et al.*, "Drought-induced Amazonian wildfires instigate a decadal-scale disruption of forest carbon dynamics," *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.*, vol. 373, no. 1760, p. 20180043, Nov. 2018.
- [19] Fonseca, M. G.; Aragão, L. E. O. C.; Lima, A.; Shimabukuro, Y. E.; Arai, E.; and Anderson, L. O., "Modelling fire probability in the Brazilian Amazon using the maximum entropy method," *Int. J. Wildl. Fire*, 2016.
- [20] Aragão, L. E. O. C. and Shimabukuro, Y. E., "The incidence of fire in Amazonian forests with implications for REDD.," *Science*, vol. 328, no. June, pp. 1275–1278, Jun. 2010.