Efeito conjunto do fogo e da exploração madeireira sobre a regeneração florestal na Amazônia

Paulo Eduardo Barni[1,4], Liana Oighenstein Anderson[2], Luiz Eduardo Oliveira e Cruz de Aragão[3], Evandro Carrijo Taquary[4], Arthur Camurça Citó[5], Reinaldo Imbrozio Barbosa[5], Edenilson Pereira Reis[6], Débora Joana Dutra[4], Daniel Braga[4], Philip Martin Fearnside[7]

[1]Universidade Estadual de Roraima – UERR, Rorainópolis, RR 69375-000 – Brasil, pebarni@uerr.edu.br; [2]Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais - CEMADEN, São José dos Campos, SP 12247-016 – Brasil; [3] Divisão de Observação da Terra e Geoinformática (DIOTG), Coordenação Geral de Ciências da Terra (CG-CT), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, SP 12227 010 - Brasil ; [4] Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto (PGSER), Coordenação de Ensino, Pesquisa e Extensão (COEPE), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, SP 12227 010 - Brasil , [5]Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA, Boa Vista, RR 69301-150 – Brasil; [6]Fundação Estadual do Meio Ambiente e Recursos Hídricos –FEMARH, Boa Vista, RR 69306-665 – Brasil; [7]Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA, Manaus, AM 69067-375 – Brasil

RESUMO

A Extração Seletiva de Madeira (ESM) e os incêndios florestais causam perturbações no dossel da floresta, sendo considerados os principais vetores da degradação florestal. Estes processos, em consonância com distúrbios adjacentes como queda de árvores, mecanização e mortalidade no sub-bosque, são potencializados pela passagem do fogo, desencadeando uma série de reações em resposta aos desarranjos iniciais, e promovendo a regeneração natural. O trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento da regeneração natural em uma floresta amazônica impactada pela ESM e pelo fogo de sub-bosque. Foram utilizadas imagens dos satélites Landsat-8 (3011/2015) e 9 (27/10/2023), Sentinel-2 (2710/2023) e Planet (04 e 25/01/2024). A regeneração natural cresceu, em média, 697,1% em áreas de ESM e sem ocorrência de fogo. Em áreas incendiadas, sem ESM, o crescimento médio da regeneração foi de 232,9% entre 2015 e 2023/2024. Os resultados indicam que a ESM causa maior impacto na regeneração natural do que os incêndios de sub-bosque.

Palavras-chave — Regeneração florestal, sensoriamento remoto, manejo florestal, impactos ambientais, Amazônia.

ABSTRACT

Selective Logging (SL) causes disturbances in the forest canopy, allowing an increase in solar radiation reaching the ground. This process combined with soil disturbances caused by the impacts of falling trees and the handling of logs by heavy machinery turning over and compacting the forest floor, triggers a series of reactions in the opposite direction to this initial disruption. Following the disturbances, regeneration begins, which, over time, promotes the restoration of the forest canopy. The main objective of this study was to evaluate the behavior of regeneration in a forest impacted by SL and by understory fire. Images from the Landsat-8 and 9 (30 m), Sentinel-2 (10 m) and Planet (3 m) satellites were used. Natural regeneration grew, on average, by 697.1% in areas with SL and without fire. In burned areas without SL, the average growth in regeneration was 232.9% between 2015 and 2023/2024. The results indicate that SL causes a greater impact on natural regeneration than understory fires.

Key words — *Forest regeneration, remote sensing, forest management, environmental impacts, Amazon.*

1. INTRODUÇÃO

A Extração Seletiva de Madeira (ESM) provoca perturbações no dossel da floresta, permitindo um aumento da radiação solar que atinge o solo [1, 2, 3]. Esse processo, juntamente com os distúrbios do solo causados pela queda de árvores e pelo manejo das toras com equipamentos florestais, desencadeia uma série de reações que podem comprometer a saúde do ecossistema. Essas perturbações contribuem para a degradação da floresta, afetando sua estrutura e função [1, 2].

Outras perturbações, como a ocorrência de incêndios florestais [2, 3], também podem causar impactos no dossel da floresta a partir da mortalidade de árvores. Após os eventos de fogo e com o passar do tempo, a floresta se regenera e recuperando a biomassa perdida com a passagem do incêndio. No entanto, estudos indicam que as florestas afetadas pelo fogo, mesmo 30 anos após sua ocorrência, estocam em média 25% menos biomassa que florestas intactas [4].

As mudanças no dossel florestal são detectadas através do comportamento espectral diferenciado dos alvos na superfície terrestre. O dossel florestal apresenta um padrão espectral característico, complexo, resultante da mistura de refletância entre vegetação fotossinteticamente ativa e não ativa, além do efeito de sombras. Quando ocorrem desmatamentos ou atividades de ESM que removem total ou parcialmente o dossel, o solo fica exposto em maior ou

menor proporção, alterando a resposta espectral. A detecção dessa resposta depende da quantidade e da área dos objetos expostos, assim como da resolução espacial e espectral dos sensores remotos orbitando a Terra. Nesse contexto, é fundamental compreender quais características dos sensores podem ser mais bem aproveitadas no estudo da temática abordada.

Na Amazônia como um todo, é comum observar a regeneração natural nas bordas da floresta [5] e em áreas que foram abandonadas devido ao manejo inadequado de pastagens e roças [6]. Esse manejo é caracterizado pelo uso intensivo do fogo em queimadas, visando recuperar pastagens e limpar áreas cultivadas. Em anos de secas severas, como as registradas durante eventos de *El Niño*, o uso descontrolado do fogo por proprietários rurais pode provocar grandes incêndios florestais, resultando na morte de centenas de milhares de árvores e contribuindo ainda mais para a degradação da floresta e para a emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) [2, 7].

Tanto a regeneração natural da floresta, provocada pela ESM, quanto à causada pelos incêndios, são relativamente pouco estudadas na Amazônia, especialmente em comparação com a regeneração em áreas desmatadas. Todos esses processos de regeneração são de grande importância para as mudanças climáticas e podem impactar significativamente as estimativas de emissões e absorções de carbono na atmosfera da Terra [2, 7].

Este estudo objetiva entender a relação do fogo com a trajetória da regeneração natural em áreas incendiadas e não incendiadas de uma floresta previamente impactada pela ESM.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

A área estudada está localizada no município de Rorainópolis, região sul do estado de Roraima, porção do extremo norte da Amazônia brasileira. Esta área, que é parte da cena Landsat de órbita / ponto 231 / 60, mediu 2.391,1 km^2 e é formada por floresta ombrófila densa, campinarana e área de tensão ecológica entre essas duas tipologias florestais. Também possui pequenas porções de vegetação não florestal de campina em solos hidromorfos e arenosos [3] (Figura 1).

2.2 Dados de campo

Os dados de campo compreenderam 294 pontos de observação (latitude, longitude) de ocorrência de ESM (tocos e restos de troncos das árvores coletadas, vestígios de pátios e carreadores) / não ocorrência de ESM (ausência de vestígios), observação da passagem do fogo: vestígios de ocorrências de incêndios, como cicatrizes na base do tronco de árvores vivas, presença de carvão no solo e árvores mortas / galhos parcialmente queimados / não ocorrência de incêndios (ausência desses indícios). Registros de regeneração natural e espécies colonizando estas áreas (82 pontos), também foram obtidos em campo, entre 2016 e início de 2024.

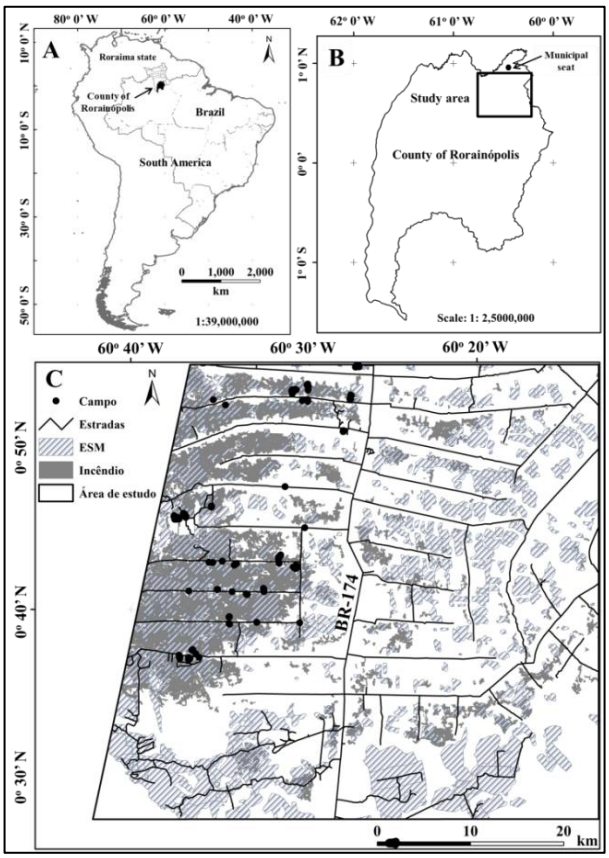


Figura 1. Área de estudo em relação ao estado de Roraima, ao Brasil e a América do Sul (A); e em relação ao município de Rorainópolis, em (B). Detalhes da área de estudo em (C): parte da cena Landsat 231/60, amostragem de campo, ESM entre 2007 a 2023 / início de 2024 e área incendiada em 2016.

2.3 Base de dados geográficos

O banco de dados geográficos compreendeu um conjunto de quatro (4) cenas de 4 sensores distintos: 1. Landsat-8 (30 m), com data de aquisição em 30/11/2015 (cenário de linha de base); 2. Landsat-9 (30 m; 27/10/2023); 3. Sentinel-2 (10 m; 27/10/2023) e 4. Imagens Planet (3 m), com mosaico de 7 cenas obtidas no dia 04 e 25 de janeiro de 2024, abrangendo a área de estudo e os pontos de campo. As três primeiras imagens resultaram de operações de corte (*clip*) de parte das cenas originais dos sensores, enquanto que a quarta imagem, resultou do mosaico de 7 cenas do sensor Planet. O mapeamento da ESM foi realizado a partir de imagens multianuais dos satélites Landsat-8 e Sentinel-2. O mapa dos incêndios ocorridos em 2016 foi obtido de [3]. Dados de desmatamento foram coletados do TerraBrasilis (https://terrabrasilis.dpi.inpe.br/). A preparação do banco de dados geográficos foi realizada utilizando o *software* livre Quantum GIS Desktop 3.34.5 (QGIS) (https://qgis.org/download/).

2.3.1 Mapeamento da vegetação secundária e análise

Para o mapeamento da vegetação secundária, foi utilizado o classificador *Random Forest* (aprendizado de máquina), disponível na plataforma do *Google Earth Engine* (GEE) (https://earthengine.google.com/). O mapeamento utilizou as três bandas do visível, a banda do infravermelho próximo (NIR), NDVI e EVI, como variáveis. Para otimizar a performance, o modelo foi parametrizado com 100 árvores de decisão e 1.000 amostras aleatórias para cada classe de uso: regeneração, solo, água/sombra, floresta e nuvem. O banco de dados foi aleatoriamente dividido em dois subconjuntos pelo classificador: o primeiro (1), com 70% dos valores, serviu como conjunto de treino ou mapeamento, enquanto os 30% restantes (2), foram utilizados como subconjunto de teste para a matriz de confusão e avaliação do mapeamento. Após o mapeamento e a vetorização da classe "regeneração", a análise dos resultados foi realizada por meio do cruzamento (*interseção* e *diferença*) dos mapas de vegetação secundária obtidos pelos diferentes sensores em 2023-2024, com o mapeamento realizado na imagem Landsat-8 de 2015 e com os mapas de ESM e de fogo.

3. RESULTADOS

O desmatamento na área de estudo foi calculado em 712,8 km^2 em 2015, ano anterior aos eventos de fogo, que impactou 415,3 km^2 de florestas [2]. A ESM foi mapeada em 403,6 km^2 no intervalo de 2007 a 2015, descontando-se as áreas que foram desmatadas após a exploração. Em 2023 e inicio de 2024, as áreas de ESM foram mapeadas em 529,8 km^2, descontando-se as áreas desmatadas no período entre 2016 e 2023 e início de 2024 (Tabela 1).

3.1. Regeneração Natural

As áreas de regeneração natural mapeadas na imagem de 2015 (Landsat-8) abrangeram uma extensão de 123,2 km^2, descontadas as áreas desmatadas entre 2007 e 2023/início de 2024. No mapeamento do Landsat-9, a regeneração alcançou 182,8 km^2 de área, 48,3% (56,6 km^2) maior do que o mapeamento de linha de base de 2015, descontadas as áreas que foram desmatadas no periodo. O mapeamento pelo sentinel-2 registrou a maior área de regeneração natural, alcançando 301,9 km^2 de área, 145,1% (178,7 km^2) maior do que o mapeamento de referência. Considerando o mapeamento obtido das imagens Planet, a regeneração natural foi mapeada em 160,6 km^2, área 30,3% (37,4 km^2) maior do que o mapeamento de linha de base e descontando-se as áreas desmatadas no período.

Considerando apenas as áreas de exploração madeireira entre 2007 e 2015, antes dos eventos de fogo em 2016, a regeneração natural cresceu 549,3% ((54,4-8,4)/8,4*100) em 2023, de acordo com o mapeamento realizado na imagem do Landsat-9 (Tabela 2).

ID*	LAND-8 30/11/2015	LAND-9 27/10/2023	SENT-2 27/10/2023	PLANET 04-25/01/2024
1	2.391,1	2.391,1	2.391,1	2.391,1
2	1.595,9	1.309,0	1.309,0	1.309,0
3	56,0	56,0	56,0	56,0
4	5,1	5,1	5,1	5,1
5	712,8	974,6	974,6	974,6
6	403,6	529,8	529,8	529,8
7	415,3	290,0	290,0	290,0
8	123,2	182,8	301,9	160,6
9	132,9	134,0	134,0	134,0
10	21,8	79,1	121,7	61,1
11	45,3	102,6	111,6	58,8
12	10,0	53,0	55,8	28,9

Tabela 1. Resultados do mapeamento da vegetação secundária na área de estudo (km^2). * 1. Área de estudo; 2. Floresta; 3. Não floresta; 4. Água/sombra; 5. Desmatamento; 6. ESM; 7. Fogo; 8. Vegetação secundária (regeneração); 9. ESM x fogo; 10. ESM x Vegetação secundária; 11. Vegetação secundária x fogo; 12. ESM x Vegetação secundária x fogo

Com fogo			
Mapeamento	**ESM 2015**	**ESM 2023/24**	**Cresc.%**
L8_x_ESM_x_L9	8,4	54,4	549,3
L8_ x _ESM_x_SENT-2	9,0	78,3	770,4
L8_x_ESM_x_PLANET	5,8	41,2	607,9
Média	**7,7**	**58,0**	**642,5**
Sem fogo			
Mapeamento	**ESM 2015**	**ESM 2023/24**	**Cresc.%**
L8_x_ESM_x_L9	2,9	15,9	452,7
L8_x_ESM_x_SENT-2	3,7	39,0	952,7
L8_x_ESM_x_PLANET	2,5	19,5	685,7
Média	**3,0**	**24,8**	**697,1**
Apenas fogo			
Mapeamento	**Fogo 2015**	**Fogo 2023/24**	**Cresc.%**
L8_x_Fogo_x_L9	20,1	64,5	220,9
L8_x_Fogo_x_SENT-2	19,2	72,6	277,9
L8_x_Fogo_x_PLANET	12,4	37,3	200,1
Média	17,2	58,1	232,9
Sem ESM / Sem fogo			
Mapeamento	**Fora 2015**	**Fora 2023/24**	**Cresc.%**
L8_x_Fora_x_L9	21,2	53,9	154,8
L8_x_Fora_x_SENT-2	26,3	124,2	371,6
L8_x_Fora_x_PLANET	17,9	69,4	288,5
Média	21,8	82,5	271,6

Tabela 2. Mapeamento (km^2) da regeneração natural entre 2007 e 2015 em áreas de ESM, em áreas incendiadas e fora dessas áreas. ESM 2015 e Fogo 2015 são áreas de regeneração mapeadas em comum por ambos os sensores dentro das áreas exploradas até 2015 e dentro das áreas incendiadas. ESM e Fogo 2023/24: resultado do mapeamento das imagens de 27/10/2023 e de 04 e 25/01/2024 por cada sensor.

O mapeamento do Sentinel-2 apontou crescimento de 770,4% ((78,3-9,0)/9,0*100) em relação ao mapeamento das áreas de regeneração em 2015. Considerando o mapeamento pelas imagens Planet, esse crescimento foi registrado em 607,9% ((41,2-5,8)/5,8*100). A área média de crescimento em 2023/2024 foi calculada em 58 km², resultando em uma média de 642,5% de crescimento em relação às áreas mapeadas em 2015, dentro das áreas de ESM (Tabela 2).

Quando analisamos exclusivamente a regeneração natural em áreas de ESM sem a ocorrência de fogo, o crescimento médio foi de 697,1% em comparação ao mapeamento de linha de base. Em contrapartida, nas áreas afetadas pelo fogo em 2016, mas fora das áreas de exploração madeireira, o crescimento médio foi de 232,9%, representando uma diminuição de 199,2% em relação à regeneração observada em áreas exploradas sem a presença do fogo. Por outro lado, ao avaliar a regeneração fora das áreas exploradas (2007 a 2023/início de 2024) e fora das áreas de ocorrência de fogo, o crescimento médio registrado foi de 271,6% (Tabela 2).

3.2. Avaliação e validação do mapeamento

A avaliação do mapeamento evidenciou uma alta coerência entre os sensores na detecção das áreas de regeneração natural. Embora a extensão das áreas mapeadas tenha apresentado discrepâncias consideráveis, provavelmente, devido a diferenças na resolução espacial, a análise da regeneração em pátios e estradas da ESM, entre 2007 e 2023/2024, revelou uma concordância média de 92,4% (R^2 ajustado = 0,9242; $p < 0,0000$), entre os sensores. A maior concordância foi observada entre o mapeamento do Sentinel-2 e das imagens Planet, com 97,4% (R^2 ajustado = 0,9739; $p < 0,0000$), enquanto a menor foi entre o Landsat-9 e Planet, com 89,7% (R^2 ajustado = 0,8974; $p < 0,0000$).

Na validação pela matriz de confusão, o mapeamento do Landsat-8 obteve uma acurácia global de 96,6%, com 96,2% de acurácia na classe de regeneração (Tabela 3). Os dados pontuais de campo foram sobrepostos ao mapeamento da regeneração, apresentando 37,8% de concordância pelo Landsat-9, 42,7% pelo Sentinel-2 e 19,5% pelo Planet.

Sensor	Acurácia Regeneração	Global
Land-8	0,9624	0,9656
Land-9	0,9554	0,9218
Sent-2	0,7946	0,8819
Planet	0,9772	0,9799

Tabela 3. Resultados da matriz de confusão.

4. DISCUSSÃO

Surpreendentemente, as áreas atingidas puramente por incêndios apresentaram índices de crescimento muito inferiores aos registrados por aquelas áreas atingidas exclusivamente pela ESM. Este fato pode ser explicado, pelo menos em parte, pela natureza da intervenção madeireira que foi realizada na área de estudo, geralmente, ESM para fins de legalização do desmatamento e aproveitamento da madeira [3]. Ou seja, praticado sem nenhum controle, visto que o objetivo final era o aproveitamento da madeira e não a conservação da floresta em pé. Em 2023 / início de 2024, apenas 25,9% dessas áreas haviam sido efetivamente desmatadas.

Por outro lado, a ocorrência de fogo de baixa intensidade (leve e moderado) pode ter "mascarado" a regeneração natural no sub-bosque, impedindo a detecção pelos sensores. No mapeamento do fogo por [3], que abrangeu a área de estudo, as classes de severidade "Leve" (light) e "Moderado" ocorreram em 69,7% da área atingida pelo incêndio.

Parte do crescimento da regeneração, ocorrido fora das áreas de ESM e fogo, pode ser atribuído ao efeito de borda na área estudada. Devido a fragmentação da floresta pelo desmatamento, grande parte da regeneração natural fora das áreas de ESM e das áreas atingidas por fogo, crescem ao longo das bordas da floresta [5].

A baixa concordância do mapeamento da regeneração com os dados obtidos em campo indicam forte interferência do dossel da floresta. Nesse caso, novas técnicas ou índices de vegetação devem ser experimentados para obtenção de melhores resultados no mapeamento da regeneração em floresta impactada por ESM e fogo na Amazônia.

5. CONCLUSÕES

Os resultados indicam que a ESM causa maior impacto na regeneração natural do que os incêndios de sub-bosque. Esse estudo pode contribuir para um melhor entendimento da dinâmica natural da regeneração e oferecer subsídios para a criação de politicas públicas que resultem na promoção da restauração e conservação da floresta.

8. REFERÊNCIAS

[1] Lapola, M. D. et al. The drivers and impacts of Amazon forest degradation. *Science*, v. 379, Issue 6630. 2023.

[2] Aragão, L. E. O. C. et al. 21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions. *Nature Communications*, v. 9: pp. 1–12. 2018.

[3] Barni, P. E. et al. Logging Amazon forest increased the severity and spread of fires during the 2015-2016 El Niño. *Forest Ecology and Management*, 500, art. 119652. 2021.

[4] Silva Junior, C. H. L. et al. Benchmark maps of 33 years of secondary forest age for Brazil. *Scientific Data*, 7 (1), 1-9, 2020.

[5] Nunes, M. H. et al. Edge effects on tree architecture exacerbate biomass loss of fragmented Amazonian forests. *Nature Communications*, v. 14, 8129. 2023.

[6] Alencar, A. A. et al. Landscape fragmentation, severe drought and the new Amazon forest fire regime. *Ecological Applications*, 25(6): 1493–1505. 2015.

[7] Silva C. V. J. et al. Estimating the multi-decadal carbon deficit of burned Amazonian forests. *Environ. Res. Lett.*, 15, 114023. 2020.