HISTÓRICO DE PERTURBAÇÃO E CLIMA AFETAM O ESTOQUE DE CARBONO DE FLORESTAS SECUNDÁRIAS COM IMPLICAÇÕES PARA A RESTAURAÇÃO FLORESTAL

Isadora Haddad [1], Aline Daniele Jacon [1], Aline Pontes Lopes [2], Lucas Andrigo Maure [1], Lênio Soares Galvão [1,3], Luiz Eduardo Oliveira e Cruz de Aragão [1,3]

[1]Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto (PGSER), Coordenação de Ensino, Pesquisa e Extensão (COEPE), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) {isadora.ruiz, aline.jacon, lucas.maure}@inpe.br; [2] re.green, Piracicaba-SP {alineplopes@gmail.com}; [3] Divisão de Observação da Terra e Geoinformática (DIOTG), Coordenação Geral de Ciências da Terra (CG-CT), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) {lenio.galvao, luiz.aragao}@inpe.br

RESUMO

Avaliar a capacidade de recuperação de áreas em regeneração natural, é essencial para definir intervenções necessárias que potencializem a regeneração de florestas secundárias. Portanto, esse estudo considerou a recuperação dos estoques de carbono em florestas secundárias localizadas no estado do Pará em idade de 1 a 35 anos, como um indicador do potencial de regeneração natural. As análises foram baseadas em dados de biomassa derivados de sensoriamento remoto, floresta secundária, uso da terra e ocorrência de fogo. Verificamos uma redução de até 26 $MgCha^{-1}$ em florestas com idade >20 anos que foram afetadas por fogo na região mais seca do estado. Essas informações podem apoiar políticas públicas de mitigação às mudanças climáticas.

Palavras-chave — Regeneração natural, Floresta secundária, Amazônia, Carbono.

ABSTRACT

Assessing the recovery capacity of areas undergoing natural regeneration is essential for defining the interventions needed to boost the regeneration of secondary forests. With this in mind, this study considered the recovery of carbon stocks in secondary forests in Pará states between 1 and 35 years as an indicator of the potential for natural regeneration. The analyses were based on biomass, secondary forest, land use and fire occurrence data. We found a reduction of up to 26 in forests aged >20 years that were affected by fire in the driest region of the state. This information can support public policies to mitigate climate change.

Key words — *Natural regeneration, Secondary forest, Amazon biome, Carbon.*

1. INTRODUÇÃO

Entre as dificuldades para a implementação da restauração em larga escala estão a disponibilidade de recursos financeiros e a falta de incentivos governamentais. Com uma capacidade de redução de custos de 56% a 74% em relação à restauração ativa (ex.: plantio de árvores) [1], os métodos de restauração passiva (Regeneração Natural - RNP) ou parcialmente passiva (Regeneração Natural Assistida - RNA) são frequentemente os de maior viabilidade financeira.

Esses métodos baseiam-se no processo de regeneração natural (RN) da vegetação após o uso antrópico e o abandono da área [2]. Também, podem associar a RN com a intervenção/assistência antrópica (RNA) que propicie melhores condições de recomposição da vegetação. Ambas são soluções baseadas na natureza que potencializam a recuperação e provisão de serviços ecossistêmicos, como o sequestro de carbono, a manutenção da biodiversidade e a regulação climática [2-3-4].

Diante disso, o objetivo deste estudo foi analisar o efeito do histórico de perturbação sobre o acúmulo de carbono acima do solo de áreas em processo de regeneração natural, como indicador da capacidade de recuperação das florestas secundárias [5]. Os resultados indicarão quais áreas necessitam de um maior grau de intervenção humana no seu processo de regeneração natural.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido para o ano de 2020 no estado do Pará para três regiões climaticamente homogêneas e distintas entre si, a região noroeste (NW), central (MW) e sudeste (SE). A divisão dessas regiões considerou os cátions no solo como *proxy* da fertilidade, a precipitação pluviométrica, a temperatura média anual, e o máximo déficit hídrico acumulado [4].

2.1. Estoquede AGC por classe de idade da FS

Estimou-se a idade das florestas por uma base de dados de florestas secundárias no Brasil (30 m de resolução espacial) no período de 35 anos (1985-2020). Um filtro foi aplicado para considerar apenas as idades que coincidem com o mapeamento da vegetação secundária do TerraClass em 2020. Posteriormente, a biomassa acima do solo (do inglês *Aboveground Biomass* - AGB) do dado ESA-cci foi atribuída a cada classe de idade de FS para estabelecer uma cronossequência. A conversão para AGC equivalente foi feita pela multiplicação da AGB pelo fator 0,456 [8].

Tendo o dado de AGC em uma grade regular de 1 ha, foram consideradas apenas as células cuja mesma idade de FS ocorresse em 80% ou mais da célula de grade. Em seguida, estas amostras de FS foram classificadas em quatro classes (Tabela 1), considerando a presença e ausência de histórico de perturbação, o uso antrópico predominante da terra [9] e a ocorrência de fogo [10], de acordo com o MapBiomas (Coleção 6) .

Sigla	Descrição
FF	Floresta secundária com histórico de predominância de cobertura florestal pretérita à regeneração (FF) e ausência de fogo (-)
FD	Floresta secundária com predominância de uso antrópico pretérito a regeneração (FD) e ausência de fogo (-)
FO	Floresta secundária com predominância de cobertura florestal pretérita a regeneração e ocorrência de fogo (FO)
FDFO	Floresta secundária com predominância de uso antrópico pretérito a regeneração (FD) e ocorrência de fogo (FO)

Tabela 1. Descrição das classes de histórico de perturbação. A predominância consiste no maior número de anos em que o pixel foi classificado como uso antrópico ou cobertura natural entre 1985 e 2019.

Curvas de incremento de AGC foram modeladas a partir da abordagem substituição espaço-tempo [4], através do modelo de crescimento Chapman-Richard. Na sequência, os valores foram sumarizados em estoque de carbono médio ($MgCha^{-1}$) acumulado nos intervalos de idade de 1-5 anos (5), 6-10 anos (10), 11-20 anos (20) e >20 anos para as quatro classes analisadas (FF, FD, FO, e FDFO).

2.2. Cálculo da recuperação relativa

O cálculo da recuperação relativa do AGC, em cada classe de idade e histórico de perturbação, foi derivado da equação (Eq.) 1 [3]. Como valor de referência, foi utilizado o valor médio das florestas maduras (FM) presentes sobre cada região climática.

$$AGCrel = e^{-\left|ln ln\left(\frac{SF_t}{FM}\right)\right|} \quad \text{Eq. (1)}$$

onde: SF é o AGC da floresta secundária para cada classe de idade t; FM é o AGC de referência da floresta primária e $AGCrel$ sendo a recuperação relativa (0 a 1) dos estoques de carbono. O resultado expressa a proporção de recuperação do AGC e varia de 0 (sem recuperação) a 1 (recuperação total), sendo multiplicada por 100 para obter os resultados em porcentagem [3].

2.3. Análise estatística

Para avaliar se o AGC nos intervalos de idade difere entre as classes de histórico de perturbação, foi conduzido o teste estatístico não-paramétrico de Kruskal-Wallis, seguido do teste de comparações múltiplas Dunn. As análises foram realizadas em linguagem de programação R [].

3. RESULTADOS

A recuperação relativa do AGC, em cada classe de idade afetada por diferentes históricos de perturbação, variou em função das regiões climáticas MW, NW e SE (Figura 1). A classe de floresta secundária FF apresentou a melhor trajetória sucessional em relação ao AGC encontrado na FM, com uma recuperação relativa média de 15%, 35%, 50% e 70% nas classes de idade 5, 10, 20 e >20 anos, respectivamente, nas três regiões climáticas.

Em relação a FF, as áreas com histórico FDFO apresentaram uma recuperação média 10% menor nas classes de idade iniciais (5 e 10 anos) em todas as regiões. Especificamente na região SE, a recuperação relativa em 20 anos e >20 anos foi 17% e 21% menor. FD apresentou respostas similares a FDFO em MW e NW. Ao analisar as áreas de FO entre as regiões, observou-se que SE foi mais afetada, com recuperação média abaixo de 45% e 60%, em 20 e >20 anos. Nas demais regiões, a recuperação em FO ficou acima desse limiar.

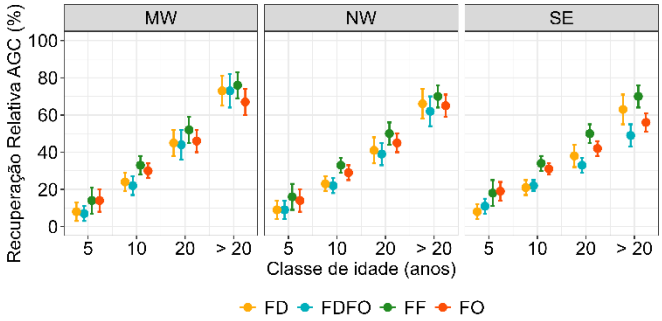


Figura 1. Recuperação relativa média do carbono acima do solo (AGC) em diferentes classes de idade da floresta em regeneração natural e históricos de perturbação por região climática.

A análise estatística mostrou que a recuperação da FS, com histórico de perturbação (FD, FO e FDFO), difere das áreas sem histórico (FF) (Figura 2). Nas diferentes regiões, o estoque médio de AGC em 5 anos não apresentou diferença significativa (*p-value* >0,05). Por outro lado, a classe de 10 anos foi significativamente diferente entre FF e o histórico de perturbação FDFO em todas as regiões. Essa mesma categoria de idade apresentou diferenças do AGC entre FF e a classe FD (região NW e SE). Ao atingir 20 anos, os efeitos do fogo aparecem de forma significativa na região SE, se intensificando em >20 anos com todas as classes de perturbação e demonstrando diferença em relação a FF.

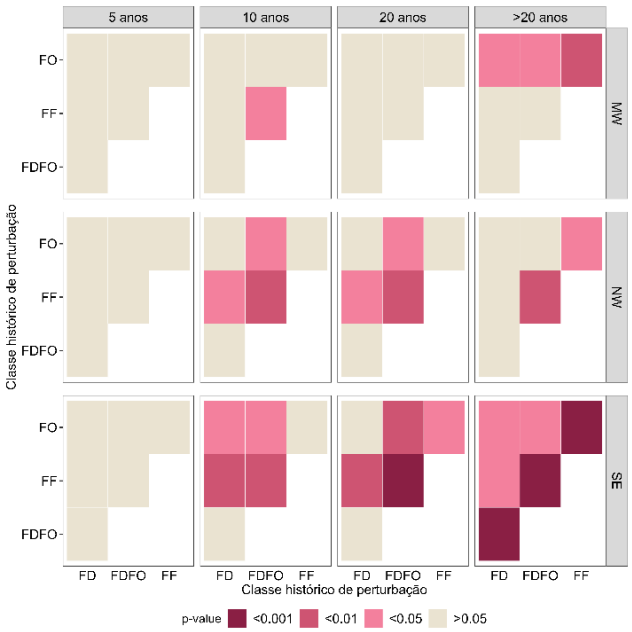


Figura 2. Resultado da análise estatística (*p-value*) entre as comparações múltiplas do AGC médio nas classes de histórico de perturbação, por idade e região climática.

Em termos de estoque de carbono, FF apresentou em média cerca 21±2 $MgCha^{-1}$ nos primeiros 5 anos de regeneração entre as regiões MW, NW e SE, 42±0,6 $MgCha^{-1}$ na classe 10 anos, 63±2,6 $MgCha^{-1}$ em 20 anos e 90±5,5 $MgCha^{-1}$ na classe >20 anos. Em MW, a maior diferença foi verificada entre FF e FDFO, onde o estoque de carbono apresentou uma redução de 13,7 $MgCha^{-1}$ na classe de 10 anos. Na região NW, FDFO acumulou 14 $MgCha^{-1}$ menos carbono na classe de idade de 20 anos.

Como observado na análise da recuperação relativa, às áreas de FS localizadas na região SE apresentaram as maiores diferenças entre FF e as áreas afetadas por histórico de perturbação. Ao comparar FF com FDFO e FD na classe de 10 anos, as FS estocaram 16,1 $MgCha^{-1}$ menos carbono. Na classe de 20 anos, os impactos no estoque de carbono foram mais expressivos, com áreas de FDFO estocando 21,8 $MgCha^{-1}$ menos carbono, chegando até em 26 $MgCha^{-1}$ na classe de >20 anos.

4. DISCUSSÃO

A avaliação da recuperação relativa do carbono acima do solo (AGC) indicou que as florestas em processo de regeneração afetadas pelo fogo são fortemente impactadas por este distúrbio [4 - 11]. Essas florestas podem apresentar uma redução da AGC superior à 20 $MgCha^{-1}$ em estágios sucessionais tardio (>20 anos). Nas regiões MW e NW, as áreas com histórico de perturbação FD e FDFO apresentaram comportamentos similares, pois são áreas que foram menos afetadas pelo fogo. Portanto, o uso da terra foi a perturbação que exerceu maior influência na recuperação relativa dos estoques de carbono [2 - 12].

Na região SE, os efeitos sobre a recuperação dos estoques de carbono foram mais expressivos sobre o histórico de perturbação associado ao fogo. Nessa região, as áreas de FS apresentaram até oito ocorrências de fogo e foram por mais tempo utilizadas como pastagem. Além disso, essa porção do estado do PA apresenta menor disponibilidade hídrica que as demais, constituindo um fator adicional que exerce pressão sobre a recuperação da FS [3 - 4]. Devido à influência conjunta do clima mais seco e da maior intensidade de eventos de fogo para uso antrópico, a regeneração natural da FS é dificultada. Isso exige intervenções humanas pelo método de regeneração natural assistida, para dar suporte a recuperação dessas áreas.

Outro aspecto importante foi determinar qual a classe de idade em que foram verificados os primeiros indícios de diferença entre a floresta em regeneração considerada como trajetória sucessional ótima (FF) e as que foram afetadas por perturbações antrópicas (FD, FO e FDFO). Nos primeiros 5 anos de regeneração, não verificou-se diferenças entre elas, o que ocorreu apenas em estágios sucessionais acima dessa idade. A partir de 6 anos, notou-se diferenças na recuperação relativa do AGC, possibilitando um monitoramento remoto dessas áreas.

Diante disso, é possível inferir sobre normativas utilizadas no estado do PA para reconhecer áreas como floresta secundária para fins de restauração. Dessa forma, seria recomendado que a FS se regenere e atinja 6 anos para ser avaliada para fins de definição da melhor técnica de restauração. Esse limiar deve ser incorporado às políticas públicas, a exemplo do Plano Estadual Amazônia Agora. Contudo, é importante que junto à análise proposta neste trabalho seja feita uma avaliação em campo a fim de validar os resultados.

5. CONCLUSÕES

Verificamos que as áreas mais afetadas por perturbações antrópicas sobre regiões de clima mais seco, apresentaram maiores dificuldades para recuperar o estoque de carbono nos diferentes estágios de regeneração. Neste contexto, intervenções humanas são necessárias para viabilizar a recuperação da vegetação em processo de regeneração, de forma a facilitar a prestação dos serviços ecossistêmicos oferecidos por esses ecossistemas. Rever políticas públicas para definir a idade mínima para incorporar a regeneração como sistema de restauração poderá contribuir para o avanço do Pará no cumprimento das metas climáticas estabelecidas. A partir disso, o monitoramento dessas áreas usando técnicas de sensoriamento remoto poderá contribuir com a proteção e recuperação desses ecossistemas.

6. AGRADECIMENTOS

IH e LAM agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro (processos 2022/16581-1, 2024/06641-2 e 2020/15230-5).

7. REFERÊNCIAS

[1] B. B. N. Strassburg, et al. Strategic approaches to restoring ecosystems can triple conservation gains halve costs. *Nature Ecology & Evolution*, v. 3:pp. 62-70, 2018.

[2] R. L. Chazdon, et al. Carbon sequestration potential of second-growth forest regeneration in the Latin American tropics. *ScienceAdvances*, v. 2, 2016.

[3] L. Poorter, et al. Multimensional tropical forest recovery. *Science*, v. 374: pp. 1370-1376, 2021.

[4] V. H. A. Heinrich, et al. Large carbon sink potential of secondary forests in the Brazilian Amazon to mitigate climate change. *Nature Communication.*, v. 12, 2021

[5] M. F. Rosenfield, et al. Ecological integrity of tropical secondary forests: concepts and indicators. *Biological Reviews*, v. 98, pp. 662-676, 2022.

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

[8] A. R. Martin, M. Doraisami, S. C. Thomas. Global patterns in wood carbon concentration across the world's trees and forests. *Nature Geoscience*, v. 11: pp. 915-920, 2018.

[9] A. Giles, J. Siqueira, C. A. Jakovac. Amazon land use duration (Versão 1). Zenodo. 2023.

[10] A. Giles, J. Siqueira, C. A. Jakovac. Amazon fire frequency. Zenodo, 2023.

[11] C. A. Pereira, et al. Recurrent wildfires alter forest structure and community composition of terra firme Amazonian forests. *Environmental Research Letter*, v. 19, 2024.

[12] C. C. Jakovac, et al. The role of land-use history in driving successional pathways and its implications for the restoration of tropical forests. *Biological Reviews*, v. 96:pp. 1114-1134, 2021.

[13] R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2024.