

ALTO POTENCIAL DE ACÚMULO DE BIOMASSA PELA REGENERAÇÃO NATURAL DE FLORESTAS SECUNDÁRIAS NA MATA ATLÂNTICA

Aline Daniele Jacon¹, Bruno Borma Brugger¹, Evandro C. Taquary¹, Miguel A. da Cunha¹, Thais P. de Medeiros¹, Poliana D. Ferro¹, Ana Carolina Moreira Pessôa³, Henrique H. G. Cassol¹, Guilherme A. V. Mataveli¹, Francisca R. S. Pereira¹, Celso H. L. Silva-Junior², Ricardo Dalagnol², Liana O. Anderson³, Luiz E. O. C. Aragão¹, Lênio S. Galvão¹

¹Divisão de Observação da Terra e Geoinformática - DIOTG, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos – SP, Brasil; {aline.jacon, bruno.brugger, evandro.taquary, miguel.cunha, thais.pereira, poliana.ferro,, guilherme.mataveli, luiz.aragao, lenio.galvao}@inpe.br, ; hlcassol@hotmail.com, franspereira@gmail.com; ²University of California Los Angeles (UCLA), 619 Charles E Young Dr E. – La Kretz Hall, Los Angeles, CA 90024, EUA; {celsohlsj, dalagnol}@ucla.edu; ³Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), Parque Tecnológico de São José dos Campos, Estrada Dr. Altino Bondensan, 500, 12247-016 - São José dos Campos - SP, Brasil; acmoreirapessoa@gmail.com; liana.anderson@cemaden.gov.br

RESUMO

Este trabalho avalia a relação entre a taxa de acúmulo de biomassa acima do solo (AGB) pelo crescimento de florestas secundárias na região sudeste do bioma Mata Atlântica e variáveis relacionadas ao clima, relevo e fragmentação florestal. Também estimamos o potencial de sequestro de carbono entre os anos de 2018 e 2035 pelo crescimento de florestas secundárias na região. Em média, florestas secundárias e áreas de regeneração natural têm o potencial de sequestrar 2,71 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹. As áreas com maior potencial de acúmulo de AGB são adjacentes a florestas antigas preservadas, localizadas principalmente em áreas com declividades mais acentuadas. As taxas de acúmulo de AGB são maiores onde há maior pluviosidade e menor déficit hídrico, e são limitadas pela fragmentação da paisagem.

Palavras-chave — Mata Atlântica, Biomassa, Florestas Secundárias, Regeneração, Fragmentação

ABSTRACT

This work assesses the relationship between the rate of aboveground biomass (AGB) accumulation by secondary forest growth in the southeastern region of the Mata Atlântica biome and variables related to climate, relief and forest fragmentation. We also estimate the carbon sequestration potential between the years of 2018 and 2035 by secondary forest growth in the region. On average, secondary forests and natural regeneration areas have the potential of sequestering 2.71 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹. The areas with the highest AGB accumulation potential are adjacent to old-growth preserved forests, located mainly in areas with steeper slopes. AGB accumulation rates are higher where there is higher rainfall and lower water deficit, and are limited by landscape fragmentation.

Key words — Atlantic Forest, Biomass, Secondary Forests, Regeneration, Fragmentation

1. INTRODUÇÃO

A crescente pressão antrópica e seus possíveis efeitos negativos sobre a biodiversidade dos ecossistemas, bem como as mudanças no clima, impulsionaram diversas iniciativas com metas ambiciosas para a restauração de ecossistemas a nível nacional e global [1]. A Organização das Nações Unidas (ONU) declarou o período 2021–2030 como a 'Década das Nações Unidas para a Restauração de Ecossistemas'. Junto com o Desafio de Bonn e a Declaração de Nova York sobre Florestas, o objetivo é restaurar 350 milhões de hectares em todo o mundo até 2030. Da mesma forma, a Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC), apresentada pelo Brasil perante o Acordo de Paris e revisada para 2022, afirma o compromisso de redução das emissões líquidas totais de gases de efeito estufa no país em 50% até 2030 (ano base 2005) [2]. A inclusão de metas de restauração florestal, como mitigação de mudanças climáticas, é baseada no potencial de redução de carbono atmosférico através do crescimento da vegetação. Em especial, florestas secundárias em crescimento apresentam altas taxas de sequestro de carbono, que podem chegar a 11 vezes mais do que florestas maduras [3].

Para que o Brasil possa atingir as metas propostas dentro de sua NDC, há a necessidade de programas efetivos que incluam a redução imediata dos níveis de desmatamento em florestas primárias, assim como a implementação de mecanismos legais que protejam as florestas secundárias [4]. Além dessas medidas de proteção das florestas existentes, o ganho de novas áreas, a partir da regeneração natural, é uma estratégia de gestão importante pois tem o potencial de gerar renda e ser aplicada em larga escala [5].

A Mata Atlântica possui remanescentes de floresta altamente fragmentados. De 34,1 Mha (26,4%) da sua cobertura florestal atual, 2,7 Mha (8,0%) regeneraram naturalmente de 1996 a 2015 [5]. Alguns dos importantes fatores que podem estar contribuindo para a regeneração natural na Mata Atlântica incluem leis que proíbem o

desmatamento em florestas secundárias (Lei da Mata Atlântica); atividades do programa de restauração - Pacto pela Restauração da Mata Atlântica; e as ações de monitoramento e fiscalização (SOS Mata Atlântica e INPE) [6]. Todavia, os fatores que influenciam o crescimento de florestas secundárias e o potencial de crescimento natural dos diferentes tipos de vegetação na Mata Atlântica ainda não são completamente compreendidos. Investigações científicas são necessárias para embasar o planejamento e a avaliação dos resultados dessas ações.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi analisar o crescimento de florestas secundárias sob a influência de diferentes fatores ambientais, assim como estimar o potencial de acúmulo de carbono por florestas secundárias até o ano de 2035. Buscou-se também analisar a relação desse acúmulo com o estado de fragmentação florestal no Bioma Mata Atlântica, nos estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo corresponde ao Bioma Mata Atlântica dentro dos estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais. A Mata Atlântica é uma das florestas tropicais/subtropicais mais fragmentadas do mundo, podendo ser considerada como um importante *hotspot* de biodiversidade [7].

Para identificar as idades dos remanescentes florestais foi utilizado o mapa de idade de floresta secundária para o ano de 2018 gerado por Silva Junior et al. [8], em que cada *pixel* corresponde à idade da floresta variando de 1 a 33 anos, com resolução espacial de 30 m. O dado de biomassa acima do solo (above-ground biomass-AGB) utilizado neste estudo foi o produto ESA-CCI AGB em Mg/ha, com 100 m de resolução espacial, para o ano de 2018 [9]. As seguintes variáveis climáticas e ambientais foram utilizadas nas análises: 1) Declividade [10]; 2) Radiação de ondas curtas (*shortwave radiation* - SW) [11] (média para o período de 1985-2018); 3) Precipitação anual [11] (média para o período de 1985-2018); 4) Máximo déficit hídrico acumulado [11] (*Maximum Cumulative Water Deficit* - MCWD) (média para o período de 1985-2018); 5) Fitofisionomias agrupadas em três grandes classes [12]: Campos de altitude (Encraves de cerrado e zonas de tensão ecológica), Floresta Estacional (Semidecidual e Decidual) e Floresta Ombrófila (Aberta, Densa e Mista). E por fim, foi utilizado o mapa de probabilidade de regeneração natural para 2035 oriundo do estudo realizado por Crouzeilles et al. [5].

2.1. Modelagem de AGB em Florestas Secundárias

Para modelar o crescimento dos remanescentes de florestas secundárias foi aplicado o método de substituição espaço-por-tempo [4] e aplicado um filtro para selecionar somente fragmentos maiores que 10 ha, evitando assim a inclusão de

áreas pequenas que possam ser influenciadas por *pixels* vizinhos na análise com outros produtos de menor resolução espacial. Para cada *pixel* de floresta secundária foi extraído o valor correspondente do dado AGB-CCI. Foram analisados valores médios de AGB por idade. Os valores de AGB nessa etapa foram agregados de acordo com o fatiamento das variáveis climáticas e ambientais em quartis [4]. Para cada limiar foi calculada a média de AGB por idade e aplicado o modelo de crescimento de Chapman-Richard para crescimento de florestas secundárias [13], utilizando a função “*nls*” disponível no pacote “*nlstools*” no *software* R. Essa etapa visou explorar a influência dos fatores no crescimento das florestas secundárias ao longo do tempo. Para as estimativas futuras de AGB, um modelo único geral foi utilizado.

Para estimar a AGB em 2035 foi utilizado o dado de floresta secundária para 2018 (sem aplicação de filtro) e o mapa de probabilidade de regeneração natural maior que 50% em 2035. Assumiu-se que todos os fragmentos de floresta secundária, identificados em 2018, seriam preservados e para cada *pixel*, com sua idade correspondente, foi somado 17 anos (diferença da idade em 2018 para 2035). Para cada *pixel* de regeneração natural [5] foi agregada a idade de 17 anos (não existia em 2018). Por fim, foi aplicado o modelo geral de crescimento Chapman-Richard, ajustado anteriormente, para estimar a AGB em cada *pixel* em 2035.

2.2. Análise da relação da AGB com a Paisagem

Foi utilizado um plano celular de 30x30 km para agregar os valores de biomassa extraídas do dado AGB-CCI para 2018 e os estimados para 2035 e, assim, analisar a relação entre a AGB e a fragmentação. Para analisar a fragmentação, extraiu-se a métrica da paisagem ‘Mean Patch Area’, que calcula a área média dos fragmentos para cada célula. O cálculo das métricas teve como base o mapa binário de “floresta” e “não floresta”, reclassificados a partir do mapa de uso e cobertura do solo para 2018 do MapBiomas [14] e foi feito utilizando o pacote “*landscapemetrics*”, acessível pelo *software* R [15]. Nessa etapa, foram consideradas como florestas tanto as primárias, quanto as secundárias (cálculo fragmentação 2018) e as novas áreas de regeneração natural (incluídas no cálculo fragmentação de 2035). A biomassa (Mg) acumulada foi obtida pela diferença entre a AGB estimada para 2035 e 2018, e a conversão para o equivalente em carbono foi feita assumindo uma proporção de 2:1 de biomassa para carbono [16].

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A filtragem resultou em 489.002 *pixels* correspondentes às diferentes idades de floresta secundária na área de estudo, representando uma área total de ~440 km². Foi observado que 50% das amostras possuíam AGB até 58 Mg/ha e estavam concentradas em florestas entre 1 e 8 anos. Silva

Júnior et al. [4] constataram, considerando todos os fragmentos independente do tamanho, que a Mata Atlântica possui as florestas secundárias mais antigas entre os Biomas brasileiros, com mais de 50% das florestas com idade entre 1 e 12 anos.

Os resultados da modelagem mostraram as diferenças entre as curvas de crescimento por limiar de cada variável (Figura 1). Heinrich et al. [3] verificaram que na Amazônia brasileira as áreas com baixa incidência de radiação SW estão associadas a maiores taxas de crescimento da floresta, assim como as áreas com alta precipitação e onde há menor déficit hídrico (MCWD). Em nossas análises encontramos elevados valores médios de AGB, entre 1 e 32 anos, relacionados à baixa radiação, alta precipitação e baixo MCWD. No entanto, não é possível afirmar se há diferenças na taxa de crescimento entre os limiares pois os dados utilizados neste estudo apresentam alta dispersão nos valores de AGB dentro do mesmo ano e entre as idades analisadas. Portanto, há necessidade de investigação mais aprofundada sobre as fontes de incertezas no conjunto amostral.

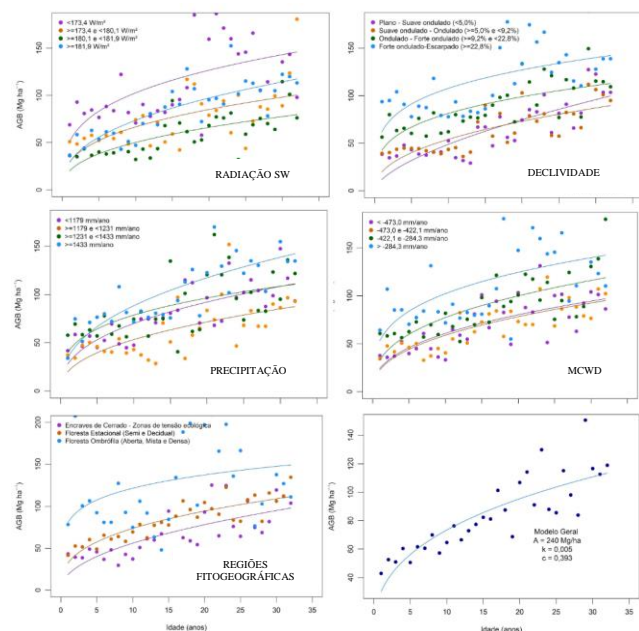


Figura 1. Acúmulo de biomassa ao longo do tempo de florestas secundárias ao longo do tempo (anos) sob diferentes condições ambientais e climáticas. As linhas nos gráficos referem-se a modelagem do crescimento para cada limiar estabelecido e para todos os dados (modelo geral).

Outro fator importante que resultou em altos valores médios de AGB para florestas jovens, em diferentes condições, são as incertezas na definição do tempo desde a última perturbação, definido com base nos mapas de uso e cobertura da terra do MapBiomias. Essas incertezas são esperadas, porém devido ao baixo número de amostras nas áreas de maior densidade de biomassa (maior declividade, maior precipitação, baixo déficit MCWD, menor radiação e em Florestas Ombrófilas) os valores discrepantes tiveram

um peso maior na análise, influenciando assim a modelagem da AGB nas diferentes condições existentes na área de estudo. Fica evidente que as áreas com relevo fortemente ondulado a escarpado ($\geq 22,8\%$) possuem maiores valores médios de AGB em todas as idades. Essas áreas correspondem, em sua maioria, às Florestas Ombrófilas localizadas na Serra do Mar, que compõem os maiores e mais preservados remanescentes de Mata Atlântica com maior densidade de AGB.

A Figura 2 mostra as diferenças entre o tamanho médio dos fragmentos em 2018 e em 2035, considerando a inclusão das áreas com alto potencial de regeneração natural [5], que somam cerca de 1,2 milhões de hectares. Observa-se que regiões com histórico agropecuário, como o oeste de São Paulo, possuem fragmentos pequenos e baixo potencial de regeneração natural (2035) e, conseqüentemente, baixo potencial de acúmulo de biomassa (estimadas a partir do modelo geral). Regiões com alto potencial de regeneração se concentram em áreas declivosas e nas proximidades de grandes áreas de remanescentes florestais [17], com alto potencial de acúmulo de biomassa. Um dos principais fatores pelo qual a proximidade da floresta promove a regeneração natural é pela maior diversidade e dispersão de sementes [5,6].

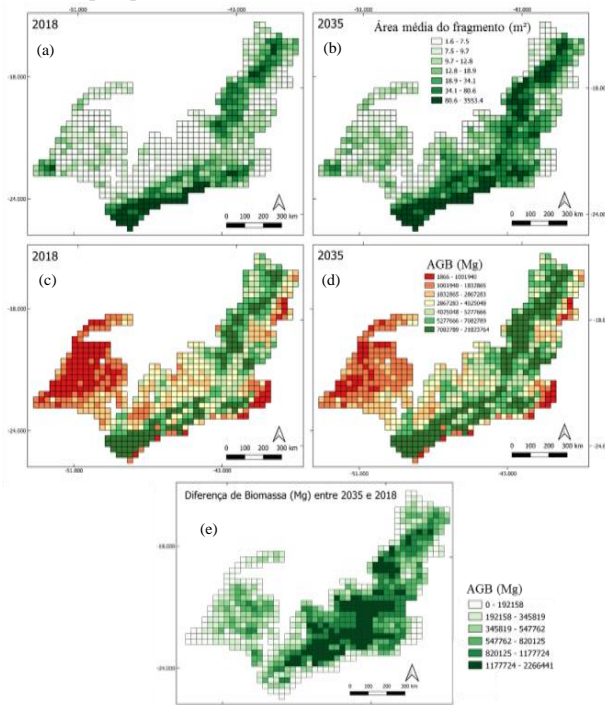


Figura 2. Estimativa da fragmentação e biomassa de florestas secundárias em 2018 e 2035 (30x30 km). Tamanho médio dos fragmentos (a, b), biomassa associada (c, d) e diferença de biomassa entre 2035 e 2018 (e).

O total de ganho de biomassa, diferença entre 2035 e 2018, foi de 448,57 Tg (224,28 Tg C) ao longo de ~4,9 Mha (~3,4 Mha de floresta secundária e ~1,2Mha de novas áreas regeneradas). A taxa média de absorção de carbono foi de 13,19 TgC ano⁻¹ ou 2,71 MgC ha⁻¹ano⁻¹. Em estudos

anteriores as estimativas de absorção média líquida de carbono variam entre $2,95 \pm 0,4$ e $3,05 \pm 0,5$ MgC $\text{ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ [3,18]. Esses estudos foram realizados com base em parcelas de campo de florestas secundárias (<20 anos) em diferentes regiões dos Neotrópicos. Diferentes fatores ambientais e antrópicos exercem grande influência nas taxas de absorção de carbono em florestas secundárias como observado por Heinrich et al. [4]. Os autores estimaram entre 1,3 a 3,0 MgC $\text{ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ a taxa para florestas secundárias na Amazônia brasileira a partir de dados de sensoriamento remoto, evidenciando assim a grande variação nas taxas para diferentes regiões e sob diferentes fatores que limitam o crescimento dessas florestas. Os valores encontrados pelo nosso estudo estão abaixo das estimativas realizadas com base em parcelas de campo, no entanto seguem dentro dos limites de valores para florestas tropicais com base em dados de sensoriamento remoto [4].

4. CONCLUSÕES

O crescimento de florestas secundárias na Mata Atlântica, nos estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais, tem o potencial de acumular $13,19$ TgC ano^{-1} ao longo de $\sim 4,9$ Mha, caso as florestas secundárias sejam preservadas e as áreas com alto potencial de regeneração não sejam convertidas em outros usos. As áreas com maior potencial de regeneração natural e de acúmulo de biomassa estão localizadas próximas a áreas de florestas maduras, indicando a importância da preservação destas áreas. Em regiões mais degradadas, como o oeste paulista, a regeneração natural é dificultada e o potencial de sequestro de carbono é baixo. No entanto, áreas altamente antropizadas também merecem atenção e investimentos para preservar e restaurar seus remanescentes florestais. Fragmentos pequenos se tornam suscetíveis a mortalidade de árvores por efeito de borda, que alteram o microclima do fragmento, e resultam em perdas de carbono e diversidade [19]. A região sudeste do país possui um histórico de intensa ocupação antrópica, e a distribuição de biomassa na região está mais intensamente relacionada aos padrões de ocupação humana do que à variação espacial de variáveis climáticas. Áreas de alta declividade apresentam maior concentração de biomassa pois são áreas de mais difícil ocupação e, portanto, mais preservadas, enquanto áreas planas na região são majoritariamente ocupadas por pastagens e atividade agrícola.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) processo 141035/2021-8 e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, pelo apoio financeiro. A Universidade de Manchester apoiou CHLSJ por meio do projeto "Forest fragmentation mapping of Amazon and its vulnerable margin Amazon-Cerrado transition forests". Este trabalho foi realizado, em parte, no

Jet Propulsion Laboratory sob contrato com NASA.. Também agradecemos ao Renato Crouzeilles e ao Eric Lino por disponibilizar o mapa de potencial de regeneração natural para a Mata Atlântica produzido junto ao Instituto Internacional para Sustentabilidade (IIS).

6. REFERÊNCIAS

- [1] Strassburg, B.B.N.; Iribarrem, A. e Beyer, H.L. "Global priority areas for ecosystem restoration." *Nature*, v. 586, pp. 724-729, October, 2020.
- [2] Brasil. República federativa do Brasil acordo de paris contribuição nacionalmente determinada-ndc. 2022.
- [3] Poorter, L. et al. "Biomass resilience of Neotropical secondary forests." *Nature*, v. 530, pp. 211–225, 2016.
- [4] Heinrich, V.H.A. et al. "Large carbon sink potential of secondary forests in the Brazilian Amazon to mitigate climate change." *Nature Communications*, v. 12, n. 1, pp. 1–11, 2021.
- [5] Crouzeilles, R. et al. "Achieving cost-effective landscape-scale forest restoration through targeted natural regeneration." *Conservation Letters*, v.13, n.3, pp.1–9, 2020.
- [6] Crouzeilles, R. et al. "A new approach to map landscape variation in forest restoration success in tropical and temperate forest biomes". *Journal of Applied Ecology*, v. 00, p. 1–12, 2019.
- [7] de Lima, R.A.F. et al. "The erosion of biodiversity and biomass in the Atlantic Forest biodiversity hotspot". *Nature Communications*, v. 11, n. 6347, 2020.
- [8] Silva Junior, C.H.L. et al. "Benchmark maps of 33 years of secondary forest age for Brazil". *Sci. Data*, v.7, n.269, pp. 1-9, 2020.
- [9] Santoro, M. e Cartus, O. "ESA Biomass Climate Change Initiative (Biomass_cci): Global datasets of forest above-ground biomass for the years 2010, 2017 and 2018, v2". Centre for Environmental Data Analysis.
- [10] Valeriano, M.M., Rossetti, D. F. "Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data". *Applied Geography*, v.32, n.2, pp.300–309, 2012.
- [11] Abatzoglou, J.T., Dobrowski, S.Z., Parks, S.A. e Hegewisch, K.C. "TerraClimate, a high- resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958-2015". *Sci. Data*, v.5, n.170191, pp.1–12, 2018.
- [12] IBGE. "Manual técnico da vegetação brasileira". 2012.
- [13] Richards, F. J. "A flexible growth function for empirical use". *J. Exp. Bot.* v.10, pp.290–301, 1959.
- [14] MapBiomass Brasil. Project MapBiomass — Collection 6 of Brazilian Land Cover and Use Map Series. 2021.
- [15] Hesselbarth, M.H.K. et al. "landscapemetrics: An open-source R tool to calculate landscape metrics". *Ecography*, v. 42, n. 1648, pp. 1657, 2019.
- [16] IPCC. Chapter 4 "Forest Land". In IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, eds. Eggleston, H. S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T. & Tanabe, K. v. 4, pp.1–29, 2006.
- [17] Ribeiro, M. C. et al. "The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation". *Biol. Conserv.*, v.142, pp.1141–1153, 2009.
- [18] Suarez, D.R. et al. "Estimating aboveground net biomass change fortropical and subtropical forests: refinement of IPCC default rates using forestplot data". *Glob. Chang. Biol.*, v.25, pp.3609–3624, 2019.
- [19] Magnago, L. F. S. et al. "Microclimatic conditions at forest edges have significant impacts on vegetation structure in large Atlantic forest fragments". *Biodivers. Conserv.* v.24, pp.2305–2318, 2015.