O IMPACTO DO DESMATAMENTO E DAS MUDANCAS CLIMÁTICAS NO BALANCO DE CO2 DA AMAZONIA DE 2010 A 2022

Luciana V. Gatti[1], Camilla L. Cunha[1], Luciano Marani[1], Egidio Arai[1], Cassiano G. Messias[1], Vagner Luis Camilotti[1], Libério J. Silva[1], Mariane S. Reis[1], Luiz H. Gusmão[1], Luciana Soler[1], Claudio Almeida[1], Ricardo Dalagnol[2], Lucas Gatti Domingues[3], Raiane A. L. Neves[1], Stephane P. Crispim[1], Ricardo Santana[1], Francine M. da Silva[1], Guilherme B.M. Machado[1], Filipe Loyola Lopes[1], Alber H. Sanchez[1], Carolina H. Silveira[1], Marcio Malacarne[1], Juan C. G. Blas[1], Sergio M. Corrêa[4]*

[1]INPE - Coordenação Geral de Ciências da Terra (CGCT-DIIAV), [2]CTREE, [3]IAG – São Paulo University
[4]UERJ – Rio de Janeiro State University; *lvgatti@gmail.com, luciana.gatti@inpe.br

RESUMO

Ao longo de 13 anos foram calculados fluxos de CO_2 e CO da Amazônia brasileira que representa ~80% da Pan-Americana. Os fluxos foram calculados a partir de perfis verticais quinzenais em 4 localidades na Amazônia. Correlacionamos esses fluxos com variáveis climáticas e antrópicas obtidas por sensoriamento remoto nas respectivas areas de influencia para cada região amostrada, tais como: temperatura, precipitação, queimadas, desmatamento, degradação, VPD, EVI e GRACE. Assim, verificamos as consequências das ações humanas, as mudanças promovidas nas condições climáticas sub-regionais e o impacto das mudanças climáticas globais nas emissões de CO_2 da Amazônia.

Palavras-chave — CO_2, carbono, Amazônia, desmatamento, mudanças climáticas.

ABSTRACT

Over 13 years' time series of CO_2 and CO Amazon fluxes, representing ~80% of the Pan-American Amazon. The fluxes were calculated from biweekly vertical profiles at 4 Amazon regions. We correlated these fluxes with climatic and anthropogenic variables obtained by remote sensing in each region's respective areas of influence, such as temperature, precipitation, biomass burning, deforestation, degradation, VPD, EVI, and GRACE. Analyzing these time series, we confirmed the consequences of human actions, the changes promoted in subregional climate conditions, and the impact of global climate change on CO_2 emissions from the Amazon.

Key words — *CO_2, carbon, Amazon, Climate change.*

1. INTRODUÇÃO

A Amazônia é a maior floresta tropical do mundo e provou ser um importante sumidouro de carbono no passado recente. Este sumidouro de carbono está a diminuir, principalmente devido ao aumento da mortalidade das árvores. A Floresta Amazônica contém cerca de 90 PgC na biomassa vegetal acima e abaixo do solo, que pode ser rapidamente liberada. As relações entre o ecossistema florestal, os ciclos da água e o clima são complexas. Estimativas indicam que a evapotranspiração florestal é responsável por até 50% da recirculação da água. Hidrologicamente, a Amazônia é uma das três principais regiões de ressurgência de ar nos trópicos e a precipitação em toda a bacia é de cerca de 2.200 mm por ano.

Ao longo de 13 anos (2010 a 2022) realizamos 893 perfis verticais com avião de pequeno porte e utilizamos sensoriamento remoto para entender os aspectos que interferem no funcionamento da floresta e as emissoes de carbono.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo investiga o fluxo de carbono em diferentes regiões da Amazônia utilizando perfis verticais coletados com avião de pequeno porte, em quatro localidades, formando um quadrante representativo de 100% da Amazônia Brasileira e 80% da Pan-Amazônia. Para avaliar a influência climática, utilizou-se o banco de dados do Global Precipitation Climatology Project (GPCP) para precipitação, com dados diários desde 1996. Além disso, a análise de temperatura foi baseada nas médias mensais das temperaturas a 2 metros de altura fornecidas pelo ERA5, disponíveis desde 1959. Esses dados permitem avaliar como variáveis ambientais contribuem para a dinâmica do carbono na região.

Outros fatores ambientais também foram considerados, incluindo armazenamento de água no solo derivado dos satélites GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) e GRACE-FO (Gravity Recovery and Climate Experiment Follow-on), o déficit de pressão de vapor (VPD) da Unidade de Pesquisa Climática (CRU) e a área queimada monitorada pelo produto MCD64A1 da coleção MODIS. Para avaliar a biomassa vegetal, utilizou-se o Índice de Vegetação (EVI), que reflete a fração de radiação fotossinteticamente ativa. Cada conjunto de dados foi ajustado para uma resolução espacial específica, a fim de criar uma análise integrada dos impactos ambientais sobre o fluxo de carbono nas áreas estudadas.

As regiões de influência foram determinadas calculando-se as trajetórias que as massas de ar percorreram desde a costa brasileira até o local de coleta (consideramos apenas a área dentro da Amazônia - linha roxa). A intensidade das cores na Figura 1 representa a frequência com que as massas de ar passaram em cada célula de 1˚ x 1˚ (~100 km x 100 km). A Pan-Amazônia corresponde a uma área total de 7.256.362 km², enquanto que a Amazônia Brasileira uma área de 4.215.763 km². Os quatro locais de coleta (Figura 1) representam as regiões: nordeste (SAN: 2,9°S, 55,0°W), sudeste (ALF: 8,8°S, 56,8°W), sudoeste (RBA: 9,4°S, 67,6°W) e noroeste (TAB 2010-12: 6,0°S, 70,1°W; TEF 2013-21: 3,4°S, 65,6°W).

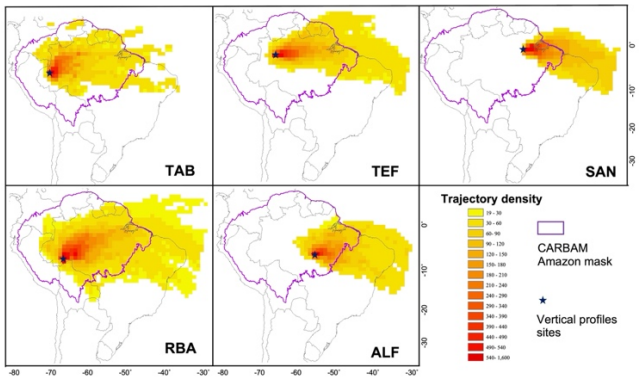


Figura 1 – Média anual da Região de influência de cada local integrando todo o período de estudo. Os codinomes SAN, ALF, RBA, TAB e TEF, representam respectivamente as regiões nordeste, sudeste, sudoeste e noroeste da Amazônia.

3. RESULTADOS

Observamos que a região de maior emissão de CO_2 foi a nordeste da Amazônia (SAN), seguida da região sudeste (ALF), enquanto que as regiões noroeste (TAB_TEF_CZS) e sudoeste (RBA) da Amazônia ficaram próximas da neutralidade [1-3]. Nestas duas últimas regiões, a emissão próxima de zero, indica que as florestas estão absorvendo aproximadamente a mesma quantidade de CO_2 que as atividades humanas estão emitindo (Figura 2).

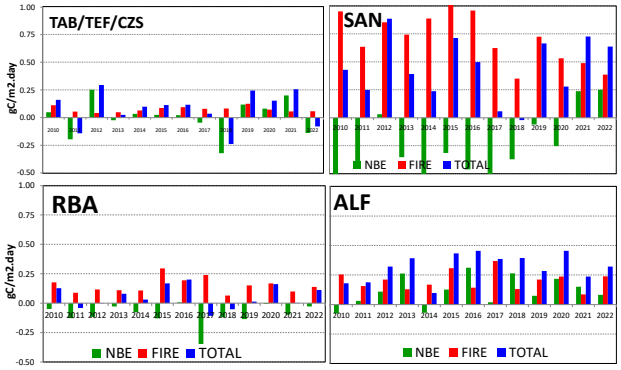


Figura 2 – Fluxo médio anual de carbono nas áreas de influencia SAN, ALF, RBA e TAB_TEF_CZS (TAB 2010-2012, TEF 2013-2021, CZS 2022).

Para responder por que as distintas regiões da Amazônia têm um papel tão diferenciado quanto às emissões de carbono, primeiramente determinamos qual a região que estava sendo representada para cada local de coleta de perfil vertical (Figura 1).

4. DISCUSSÃO

Foi calculado o desmatamento acumulado [4] e observou-se que a região mais desmatada é a que emite mais CO_2. As duas regiões a oeste, onde a floresta consegue absorver uma quantidade de CO_2 que compensa as emissões das atividades humanas, têm o desmatamento inferior a 20%.

Para se entender como o desmatamento alterou as condições climáticas em cada região, foi realizado um estudo ao longo dos últimos 40 anos [1] sobre a quantidade de chuva mensal (mm) [5] e a temperatura média mensal (˚C) [6], em cada região estudada (Figuras 3 e 4).

O estudo mostrou que a precipitação e a temperatura foram alteradas de maneira diferenciada, tanto nas regiões estudadas, como ao longo do ano dentro das quatro décadas avaliadas. Observamos que a principal alteração climática ocorreu durante os meses de agosto, setembro e outubro (pico da estação seca).

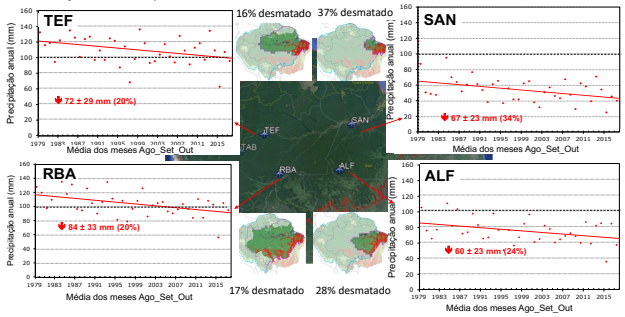


Figura 3 – médias de precipitação (mm) nos meses de agosto, setembro e outubro nos últimos 40 anos nas regiões SAN, ALF, RBA e TEF. Estão apresentados a totalidade do desmatamento dentro da região de influência e em vermelho as áreas desmatadas e a perda de precipitação.

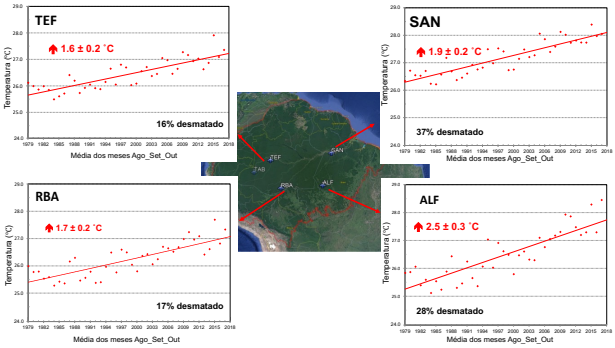


Figura 4 – médias de temperatura nos meses de agosto, setembro e outubro nos últimos 40 anos nas regiões de influência de SAN, ALF, RBA e TEF. Estão apresentados em cada região a totalidade do desmatamento dentro da região de influência (em vermelho) e foi calculado quanto aumentou a temperatura (˚ C) ao longo dos 40 anos

Observamos ainda que a última década da série apresentou tanto um aumento importante de temperatura, como uma redução mais intensa na precipitação para os meses de pico da estação seca. Observamos uma relação direta entre o desmatamento e a perda de chuva, no pico da estação seca e aumento da temperatura [1].

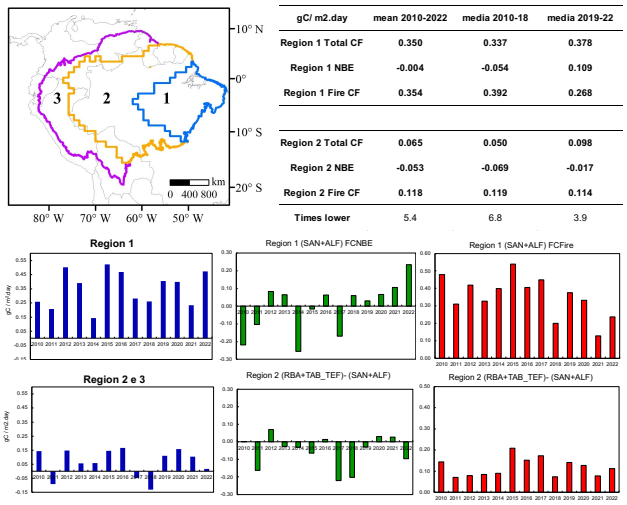
A região nordeste da Amazônia (SAN), com desmatamento acumulado de 37%, apresentou perda de 34% de chuva nos meses de agosto, setembro e outubro, e um aumento de 1,9 ˚C neste período, ao longo dos 40 anos estudados. Essa região corresponde a uma área de 703.621 km² e emite 390 milhões de toneladas de CO_2 por ano. A região sudeste da Amazônia (ALF), com desmatamento acumulado de 28%, apresentou perda de 24% de chuva nos meses de agosto, setembro e outubro, e um aumento de 2,5 ˚C neste período. Essa região corresponde a uma área de 1.484.117 km² e emite 628 milhões de toneladas de CO_2 por ano. A região sudoeste da Amazônia (RBA), com desmatamento acumulado de 17%, apresentou perda de 20% de chuva nos meses de agosto, setembro e outubro, e um aumento de 1,7 ˚C neste período. Essa região corresponde a uma área de 3.515.577 km² e emite 211 milhões de toneladas de CO_2 por ano. Por fim, a região noroeste da Amazônia (TAB_TEF_CZS), com desmatamento acumulado de 16%, apresentou perda de 20% de chuva nos meses de agosto, setembro e outubro, e um aumento de 1,6 ˚C neste período. Essa região corresponde a uma área de 2.917.132 km² e emite 107 milhões de toneladas de CO_2 por ano.

Observamos que as regiões mais desmatadas apresentam um cenário mais intenso quanto ao nível de estresse climático a que a floresta está submetida e os efeitos sobre seu funcionamento. A prática dos desmatadores na Amazônia de colocar fogo na vegetação abatida, no período em que a floresta está mais seca e as temperaturas mais altas, piora ainda mais o cenário pela facilidade com que o fogo adentra a floresta não desmatada.

Unificando as regiões estudadas de acordo com o nivel de desmatamento (Figura 5), temos as regiões do lado leste da Amazônia (SAN e ALF; região 1) e do oeste (RBA e TAB_TEF_CZS; região 2). Ao separarmos estas regiões onde o desmatamento no leste é superior a 25% e no oeste inferior a 20%, observamos uma clara diferença no comportamento da floresta e nas condições climáticas.

A região 1 (SAN + ALF), que corresponde a uma área de 1.625.410 km², apresentou desmatamento acumulado de 37%, redução na precipitação de 28% e aumento de 2,3 ˚C na temperatura nos meses de agosto, setembro e outubro ao longo dos últimos 40 anos. Essa região emitiu em média 1,28 bilhões de toneladas de CO_2 por ano, no período entre 2010 e 2022.

A Região 2 que corresponde a integração das regiões RBA e TAB_TEF_CZS, corresponde a uma área de 2.623.107 km², apresentou desmatamento acumulado entre 15-17%, e apresentou uma redução de 20% na precipitação e aumento de temperatura de 1,6 ˚C, no periodo de agosto, setembro e outubro ao longo dos últimos 40 anos. Essa região emitiu em média 0,24 bilhões de toneladas de CO_2 por ano, no período entre 2010 e 2022.



gC/ m2.day	mean 2010-2022	media 2010-18	media 2019-22
Region 1 Total CF	0.350	0.337	0.378
Region 1 NBE	-0.004	-0.054	0.109
Region 1 Fire CF	0.354	0.392	0.268
Region 2 Total CF	0.065	0.050	0.098
Region 2 NBE	-0.053	-0.069	-0.017
Region 2 Fire CF	0.118	0.119	0.114
Times lower	5.4	6.8	3.9

Figura 5 – a) Região 1 representa a integração das regiões de SAN e ALF e a região 2 representa a integração das regiões RBA e TAB_TEF_CZS, subtraída pela área já representadas por SAN e ALF; b) Tabela com os resultados para as regiões de emissão total, NBE e fogo para o período de 2010-2022, anterior a aceleração do desmatamento (2010-18) e posterior (2019-2022) e c) figura apresentando as variabilidades anuais para as duas regiões.

A diferença mais importante entre as duas regiões corresponde ao percentual já desmatado. Observamos que na região 2 a floresta não apresenta, de maneira geral, estresse climático durante os meses de agosto a outubro, pois a precipitação varia entre 80 e 100mm. Na região 1, constatamos que a floresta sofre estresse climático nos meses de agosto a outubro, pois a precipitação varia entre 40 e 60mm e a temperatura apresenta de 2 a 2,5˚C. Nesta condição a floresta fica mais inflamável, resultando em maior mortalidade das arvores. Comparando as duas regiões quanto as emissões de CO_2, observamos que a região 1 emitia 7 vezes mais do que a região 2 no periodo de 2010-2018, porém no periodo de 2019 a 2022 esta diferença reduziu para 4 vezes. Esta redução se deu pela intencificação do desmatamento na região 2, a partir de 2019. Na Figura 6 podemos observar o resultado para toda a Amazônia. Observando os resultados anuais de balanço total de carbono para a Amazônia (azul), fica evidente a variabilidade dos resultados de 2010 a 2018. É importante salientar que houve em 2010 um evento de El Niño moderado com a anomalia de temperatura alta no Oceano Atlântico Norte, um El Niño muito forte nos anos 2015 e 2016, e os demais anos foram classificados entre chuvosos e moderados. Observamos que, em anos muito chuvosos, o balanço total ainda pode ser neutro ou ligeiro sumidouro (2011, 2017 e 2018). No entanto, a partir de 2019, quando o desmatamento aumentou mais de 90% em relação ao período anterior, o comportamento de fonte importante de carbono fica constante, mostrando que as ações humanas têm um impacto muito grande sobre a floresta. Além de ficar

evidente este impacto, observamos ainda que, removendo as emissões de queimadas, a Amazônia como um todo representou emissão de carbono nos últimos 3 anos desta série temporal.

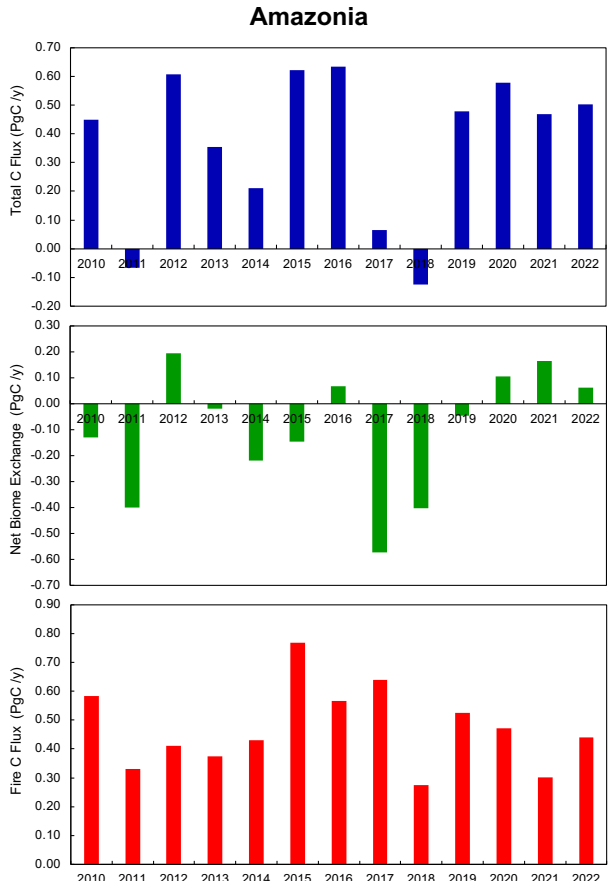


Figura 6 – a) Em azul é apresentado o balanço total de carbono da Amazonia em PgC/ano para os anos de 2010 a 2022. b) Em verde é apresentado o NBE (net bioma exchange: total – fogo) e c) as emissões anuais por queima de biomassa da Amazonia em PgC/ano para os anos de 2010 a 2022.

Entender os impactos do estresse climático sobre o funcionamento da floresta é um tópico muito importante para o avanço no entendimento sobre as florestas e as mudanças climáticas. A partir de maio de 2022, o LaGEE iniciou medidas de COS (sulfeto de carbonila) que faz um papel de traçador de fotossíntese. Observamos que as regiões mais afetadas fazem menor redução de COS e as mais preservadas mais redução de COS, indicando que nestas regiões ocorrem uma maior absorção de carbono. Com estas medidas poderemos avaliar se sob estresse climático a floresta reduz a fotossíntese.

5. CONCLUSÕES

A perda da vegetação por desmatamento e degradação e queimadas está afetando mais intensamente a região leste da Amazônia, indicada na Figura 5 como região 1, que contempla o estado do Pará, o norte do Mato Grosso e um pedaço do estado do Maranhão, na sua região nordeste. Nesta região, em média 28% desmatada, ao longo dos últimos 40 anos, já se observa perda de chuva em 28% e aumento médio na temperatura de 2,3˚C. Esta situação também está causando estresse climático para a floresta que ainda está em pé. Este entendimento nos auxilia no desenvolvimento de políticas publicas para priorizar as áreas que devem ser protegidas e processos de restauração florestal. No entanto, com o avanço do desmatamento na região 2, que compreende os estados do Acre, Rondônia, Roraima e parte oeste do Amazonas, apresentou preocupantes aumentos de emissão e redução na diferenciação entre as regiões 1 e 2.

Observamos ainda que o impacto das ações humanas na Amazônia foi maior que os impactos das mudanças climáticas globais dentro do período de 2010 a 2022.

8. REFERÊNCIAS

[1] Gatti, L. V. et al. Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change.Nature 595, 388–393 (2021). https://doi.org/10.1038/s41586-021-03629-6

[2] Gatti, L.V. et al., Increased Amazon carbon emissions mainly from decline in law enforcement. Nature 621, 318–323 (2023). https://doi.org/10.1038/s41586-023-06390-0

[3] Gatti, L. V., et al., Drought Sensitivity of Amazonian Carbon Balance Revealed by Atmospheric Measurements, Nature, 506, 76–80 (2014). https://doi.org/10.1038/nature12957

[4] PRODES. Amazon Deforestation Monitoring Project (PRODES/INPE). http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas /amazonia/prodes (2022).

[5] Huffman, G. J. et al. Global precipitation at one-degree daily resolution from multisatellite observations. J. Hydrometeorol. 2, 36–50 (2001).

[6] Hersbach, H. et al. The ERA5 global reanalysis. Q. J. R. Meteorol. Soc. 146, 1999–2049 (2020).

[7] Leite-Filho, A. T., Soares-Filho, B. S., Davis, J. L., Abrahão, G. M. & Börner, J. Deforestation reduces rainfall and agricultural revenues in the Brazilian Amazon. Nat. Commun. 12, 2591 (2021).

[8] BDQueimadas. INPE Biomass burning Program. https://queimadas.dgi.inpe.br/ queimadas/bdqueimadas (2022).

[9] Esquivel-Muelbert, A. et al. Compositional response of Amazon forests to climate change. Glob. Change Biol. 25, 39–56 (2019).

9. AGRADECIMENTOS

Este estudo de longo tempo teve financiamentos da FAPESP (16/02018-2, 11/51841-0, 08/58120-3, 18/14006-4, 18/14423-4, 18/18493-7, 19/21789-8, 11/17914-0), projeto AMAZONICA (NERC -NE/F005806/1), NASA grants (11-CMS11-0025, NRMJ1000-17-00431), ERC Horizon 2020 (649087), 7FP EU (283080), MCTI/CNPq (2013), CNPq (134878/2009-4).