

Estudos Geográficos

Revista Eletrônica de Geografia

Variação espacial e sazonal do sequestro de carbono no município de Goiânia (GO)

Karen Myllene Lima de Oliveira ¹  

Diego Tarley Ferreira Nascimento ²  

Resumo: O avanço de estudos voltados à compreensão da dinâmica do carbono atmosférico em áreas remanescentes do Cerrado é fundamental em perspectivas locais e globais. Esta investigação busca avaliar a variação espacial e sazonal do fluxo de CO₂ nas diferentes fitofisionomias de vegetação preservada no município de Goiânia-GO, durante o período de abril a setembro. Para isso, foi utilizada a modelagem do Índice de Sequestro Florestal de Carbono (CO₂flux), indicador da eficiência da vegetação na retenção de carbono. O índice foi desenvolvido a partir da integração entre o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e o Índice de Reflectância Fotoquímica (PRI). Na elaboração dos índices espectrais, foram utilizados imagens do satélite Sentinel 2A, de abril e setembro de 2024. Os resultados demonstraram a variação da biomassa verde ativa e da correspondente atividade fotossintética entre o período chuvoso e a estiagem, reforçando a influência da sazonalidade das chuvas no potencial de estoque de carbono. Por fim, tais aspectos verificados para o Cerrado indicaram a necessidade de manutenção e regeneração das florestas para diminuir a emissão dos gases de efeito estufa como o CO₂.

Palavras-chave: CO₂flux; Sensoriamento Remoto multiespectral; Remanescentes de vegetação; Serviços ecossistêmicos.

¹ Mestranda pelo Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Goiás (PPGEO/UFG). E-mail: karenoliveira@discente.ufg.br

² Professor Adjunto da Universidade Federal de Goiás (UFG), credenciado aos Programas de Pós-Graduação em Geografia (PPGEO) e em Ciências Ambientais (PPGCIAMB). E-mail: diego_nascimento@ufg.br



Este artigo está licenciado com uma licença Creative Commons

SPATIAL AND SEASONAL VARIATION IN CARBON SEQUESTRATION IN THE MUNICIPALITY OF GOIÂNIA (GO)

Abstract: Advances in studies aimed at understanding atmospheric carbon dynamics in remaining areas of the Cerrado are fundamental from both local and global perspectives. This research seeks to evaluate the spatial and seasonal variation of CO₂ flux in different vegetation types preserved in the municipality of Goiânia, Goiás, during the period from April to September. To this end, the Forest Carbon Sequestration Index (CO₂flux) model was used, which is an indicator of the efficiency of vegetation in carbon retention. The index was developed from the integration of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the Photochemical Reflectance Index (PRI). Sentinel 2A satellite images from April and September 2024 were used to develop the spectral indices. The results showed the variation in active green biomass and corresponding photosynthetic activity between the rainy and dry seasons, reinforcing the influence of seasonal rainfall on carbon storage potential. Finally, these findings for the Cerrado indicated the need to maintain and regenerate forests to reduce greenhouse gas emissions such as CO₂.

Keywords: CO₂flux; Multispectral remote sensing; Vegetation remnants; Ecosystem services.

VARIACIÓN ESPACIAL Y ESTACIONAL DEL SECUESTRO DE CARBONO EN EL MUNICIPIO DE GOIÂNIA (GO)

Resumen: Los avances en los estudios destinados a comprender la dinámica del carbono atmosférico en las áreas restantes del Cerrado son fundamentales tanto desde una perspectiva local como global. Esta investigación busca evaluar la variación espacial y estacional del flujo de CO₂ en diferentes tipos de vegetación conservados en el municipio de Goiânia, Goiás, durante el período comprendido entre abril y septiembre. Para ello, se utilizó el modelo Índice de Secuestro de Carbono Forestal (CO₂flux), que es un indicador de la eficiencia de la vegetación en la retención de carbono. El índice se desarrolló a partir de la integración del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y el Índice de Reflectancia Fotoquímica (PRI). Se utilizaron imágenes del satélite Sentinel 2A de abril y septiembre de 2024 para desarrollar los índices espectrales. Los resultados mostraron la variación de la biomasa verde activa y la actividad fotosintética correspondiente entre las estaciones lluviosa y seca, lo que refuerza la influencia de las precipitaciones estacionales en el potencial de almacenamiento de carbono. Por último, estos hallazgos para el Cerrado indicaron la necesidad de mantener y regenerar los bosques para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, como el CO₂.

Palabras clave: CO₂flux; Teledetección multiespectral; Restos de vegetación; Servicios ecosistémicos.

INTRODUÇÃO

A intensificação do efeito estufa, decorrente da maior emissão do dióxido de carbono (CO₂) pelas atividades antrópicas, tem desajustado o balanço de radiação global (IPCC, 2021). Por tal motivo, os esforços de mitigação das mudanças climáticas concentram-se na redução das emissões e no sequestro e estoque do dióxido de carbono.

Nesse contexto, salienta-se que a vegetação remanescente do bioma Cerrado possui uma grande capacidade de estoque de carbono, de cerca de 13,7 bilhões de toneladas, das quais aproximadamente 2/3 permanecem estocados no solo e no sistema radicular (Bustamante et al., 2012). Por tal motivo, o bioma apresenta uma relevante contribuição na mitigação das mudanças climáticas no Brasil.

Todavia, a diversidade de fitofisionomias do Cerrado condiciona variações expressivas na capacidade e na dinâmica de sequestro e estoque de carbono pela vegetação, reforçando a necessidade de estratégias de conservação que considerem essa característica (Lopes; Miola, 2010).

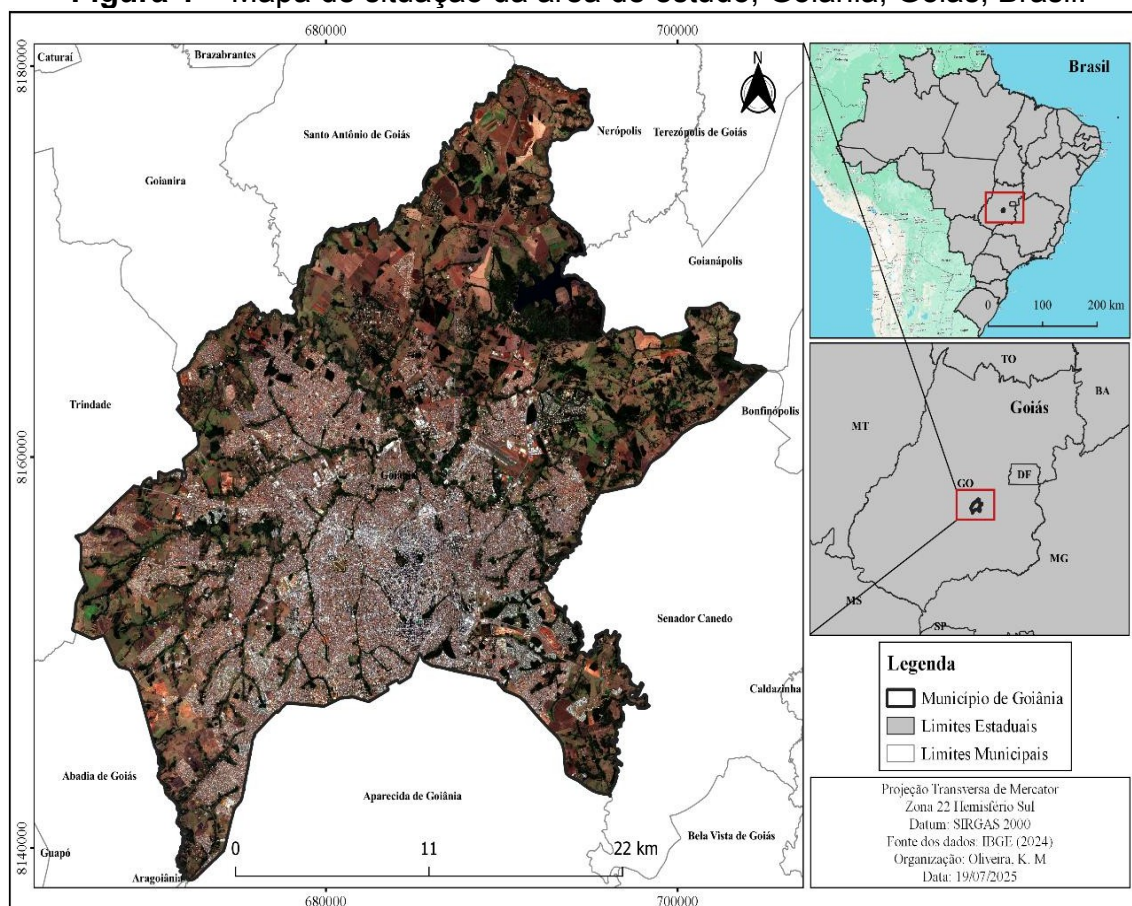
Portanto, entender como o sequestro de carbono varia, tanto no espaço quanto no tempo, em diferentes fitofisionomias do Cerrado, é crucial para o desenvolvimento de estratégias eficazes e sustentáveis de gestão e mitigação das mudanças climáticas.

Dessa forma, o presente trabalho objetiva estimar a variação espacial e sazonal do fluxo de CO₂ nas diferentes fitofisionomias de vegetação remanescente do município de Goiânia-GO entre os meses de abril e setembro de 2024 – contemplando, assim, os períodos chuvoso e de estiagem.

Área de estudo

A área em estudo compreende o município de Goiânia (Figura 1), que representa a capital do estado de Goiás, na região Centro-Oeste do Brasil. Segundo o último Censo Demográfico realizado em 2022, o município possui 1.437.366 habitantes, distribuídos em uma área territorial de 729,29 km² (IBGE, 2022).

Figura 1 – Mapa de situação da área de estudo, Goiânia, Goiás, Brasil.

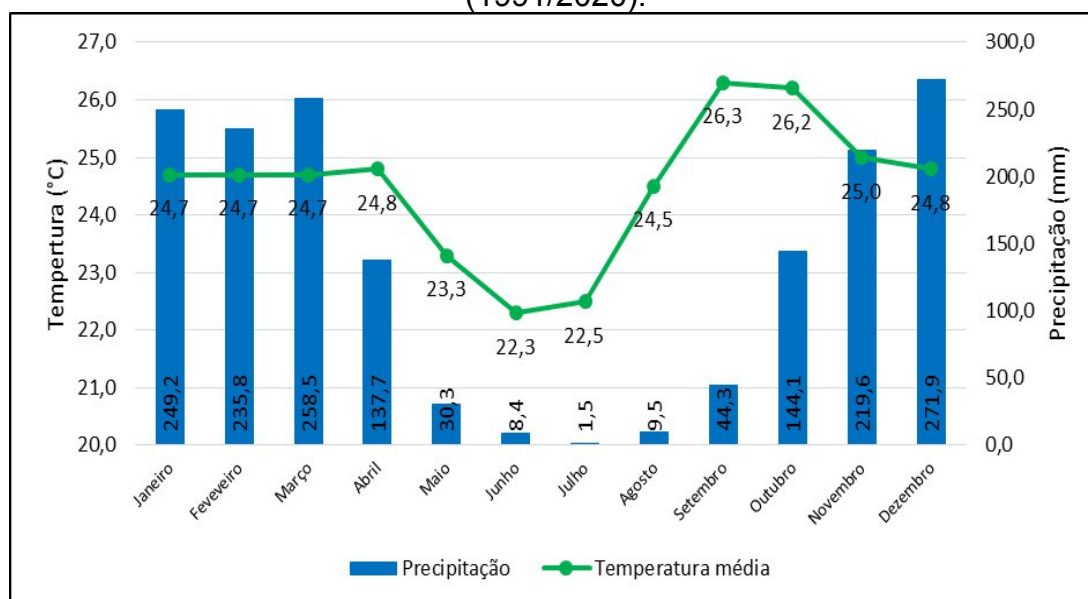


Fonte: Os autores (2025)

A cidade de Goiânia foi fundada em 1933, com o objetivo de substituir a antiga capital do estado de Goiás Vila Boa (atual Cidade de Goiás). Atualmente, ela é considerada uma metrópole (IBGE, 2020), se destacando no comércio, na oferta de ensino superior e na prestação de serviços públicos (principalmente de saúde). Segundo Ribeiro (2004), tais características atraíram um forte fluxo migratório, sobretudo advindos dos estados do Maranhão, Pará, Piauí, Bahia e Minas Gerais. Nascimento e Oliveira (2018) explicam que esse processo migratório, associado ao êxodo rural e ao próprio crescimento vegetativo da população local, resultou em um intenso crescimento demográfico em Goiânia, principalmente entre as décadas de 1950 e 1980.

Segundo Nascimento (2024), o município de Goiânia possui características marcantes do clima tropical semiúmido (tipologia Aw, na classificação de Köppen-Geiger). O gráfico da Figura 2 demonstra a marcante sazonalidade das chuvas: um período de estiagem de cinco meses, entre maio e setembro, em contraste ao período chuvoso de outubro a abril, que concentra cerca de 94% do total anual (1.610 mm).

Figura 2 – Médias mensais de precipitação e temperatura média de Goiânia (1991/2020).



Fonte: Normais Climatológicas do INMET, organizada pelos autores (2025).

METODOLOGIA

A forma usualmente empregada para quantificar o fluxo de CO₂ envolve o uso de torres micrometeorológicas equipadas com sensores que monitoram, em tempo real, as trocas gasosas entre a atmosfera e a superfície (Jardim, 2022). Contudo, essas torres cobrem apenas uma parcela ínfima dos ecossistemas naturais (Baldocchi; Peñuelas, 2019). No Brasil, ampliar essa rede de observação e manter medições contínuas de diferentes gases atmosféricos permanece um desafio considerável.

No entanto, de acordo com Rahman (2000) e Baptista (2003), é possível estimar o sequestro de CO₂ na vegetação a partir do processamento digital de imagens de satélite, por meio da integração do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada - NDVI (Rouse *et al.*, 1973) e do Índice de Reflectância Fotoquímica - PRI (Gamon *et al.*, 1997).

Desse modo, além da revisão bibliográfica, os procedimentos metodológicos compreenderam etapas relativas ao processamento digital de imagens de satélite, a partir das etapas de seleção das cenas, implementação de índices espectrais (NDVI e PRI), reescalonamento dos valores (sPRI) e, por fim, obtenção das estimativas de estoque de carbono (CO₂flux). Na sequência é melhor detalhado os procedimentos para mensuração dos índices espectrais.

Para estimar o sequestro de CO₂ nas distintas fitofisionomias dos remanescentes de Cerrado, utilizaram-se como variáveis explicativas dois índices espectrais: o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI - sigla em inglês para *Normalized Difference Vegetation Index*) e o Índice de Refletância Fotoquímica (PRI – sigla em inglês para *Photochemical Reflectance Index*).

O NDVI foi concebido por Rouse et al. (1973) para estimativa do vigor e atividade fotossintética da vegetação, a partir da diferença entre as bandas do infravermelho próximo e vermelho (Equação 1), cujos resultados variam de -1 (baixo) a 1 (alto). Para o contexto do Cerrado, valores elevados de NDVI sinalizam fitofisionomias densas e fisiologicamente vigorosas, ao passo que valores reduzidos refletem vegetação estressada ou a inexistência de cobertura vegetal (Viganó *et al.*, 2011).

Equação 1

$$NDVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{Red}) (1)}{(\rho_{NIR} + \rho_{Red})}$$

Onde: ρ_{NIR} é a refletância no espectro do infravermelho próximo, e ρ_{Red} é a refletância no espectro do vermelho.

Por sua vez, o PRI responde às variações da concentração de carotenóides nas folhas, sendo indicativos da eficiência de aproveitamento da radiação fotossinteticamente ativa e, por extensão, da quantidade de CO₂ assimilada pela folhagem por unidade de energia absorvida (Almeida; Rocha, 2018). Enquanto o NDVI estima a densidade e a saúde da vegetação, o PRI reflete a eficiência fotossintética, ambas importantes para avaliar a absorção de carbono. Conforme demonstrado pela Equação 2, o PRI é produto da razão entre as bandas do azul e verde.

Equação 2

$$PRI = \frac{(\rho_{Blue} - \rho_{Green}) (2)}{(\rho_{Blue} + \rho_{Green})}$$

Onde ρ_{Blue} é a refletância no espectro azul, e ρ_{Green} é a refletância no espectro verde.

Para possibilitar a correlação entre o NDVI e o PRI, Baptista (2003, 2004) enfatiza que os resultados deste último índice devem ser reescalados para valores positivos (entre 0 e 1, gerando, dessa forma, um novo índice: o sPRI (sigla do inglês *scaled Photochemical Reflectance Index*) - Equação 3.

Equação 3

$$SPRI = \frac{(SPRI + 1) (3)}{2}$$

Conforme a abordagem desenvolvida por Rahman (2000), a integração dos índices NDVI e sPRI gera o indicador fluxo de CO₂ (CO₂flux), demonstrado a partir da Equação 4.

Equação 4

$$CO_2flux = NDVI * sPRI$$

Para a implementação dos índices espectrais e mensuração do estoque de carbono entre as diferentes fitofisionomias de vegetação, foram empregadas imagens ópticas do satélite Sentinel 2A, disponibilizadas pelo Programa *Copernicus* de Observação da Terra – ESA (<https://browser.dataspace.copernicus.eu/>). Para obtenção dos melhores valores de reflectância dos pixels, foi calculada a mediana dos números digitais de cada pixel para as cenas disponíveis para os meses de abril e setembro de 2024, o primeiro mês compreendendo o período chuvoso e o segundo o seco. Todo o processamento de dados foi realizado usando o *Google Earth Engine*. Por fim, tanto o tratamento estatístico como a composição dos mapas foram realizados com o suporte do software Qgis, versão 3.44.0 *Solothurn*.

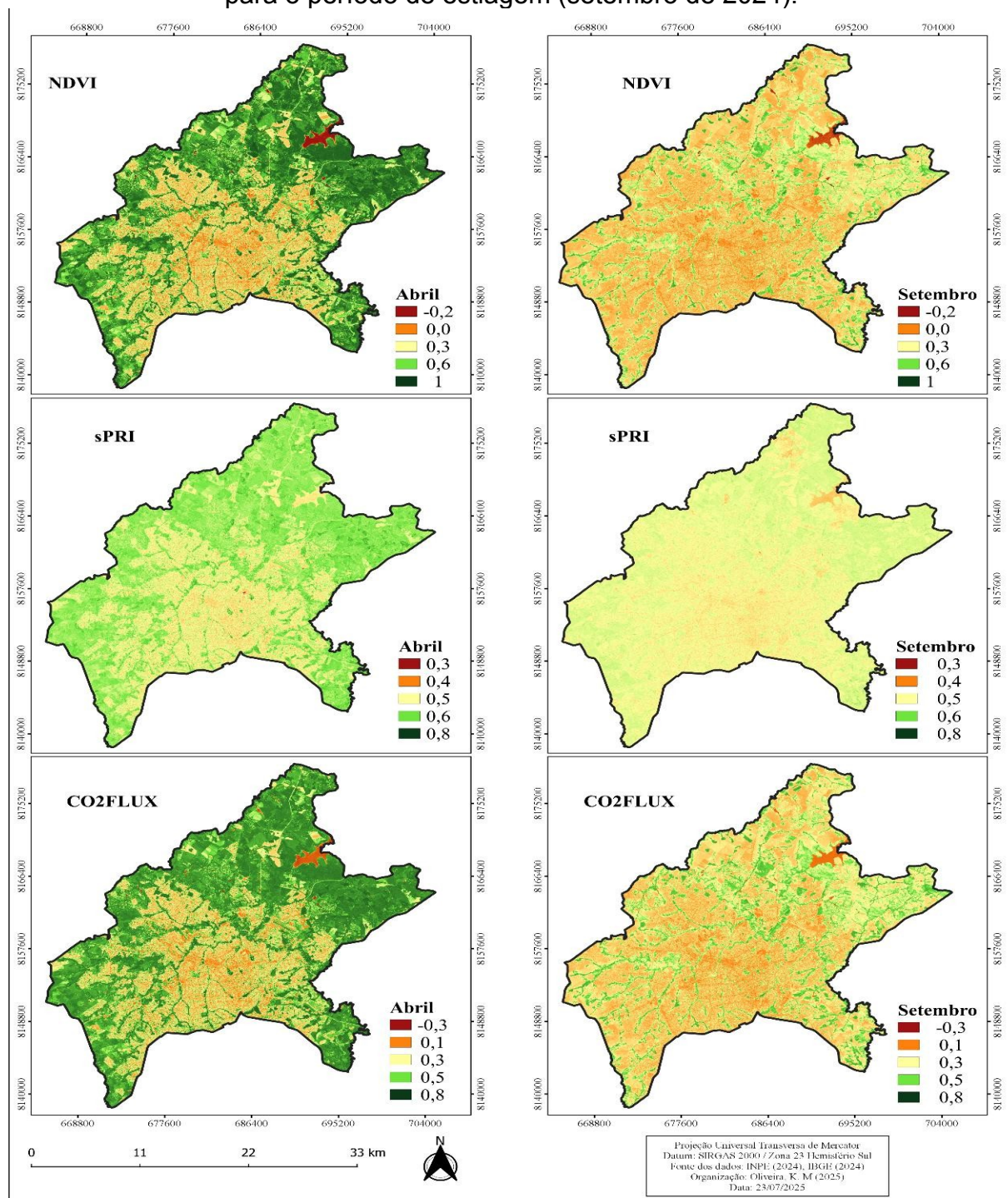
RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme se observa a partir da Figura 3, há uma notória redução do NDVI entre o final da estação chuvosa (abril) e o final da estiagem (setembro), ocorrendo também, consequentemente, com o sPRI e o CO₂flux. A perda de vigor da vegetação e a redução da atividade fotossintética e da biomassa verde ativa é reflexo da sazonalidade das chuvas na área em estudo, condicionando maior potencial de captura de carbono no período úmido e declínio acentuado na estação seca.

Em ambos períodos (abril e setembro), os maiores valores de NDVI/sPRI/CO₂flux correspondem aos locais com fragmentos de vegetação, às áreas próximas aos corpos hídricos e numa porção norte do município, onde há uma predominância de vegetação arbórea mais densa, classificada como Floresta Estacional Semidecídua e Decídua (Lopes; Romão, 2006). Em contraste, o núcleo

urbano, as manchas de solo exposto e as áreas de atividade agropecuária recente exibem NDVI muito baixo e, por conseguinte, CO₂flux próximo de zero ou negativo, caracterizando mínima ou ausência de atividade fotossintética.

Figura 3 – Índices sPRI, NDVI e CO₂Flux para o período chuvoso (abril de 2024) e para o período de estiagem (setembro de 2024).



Fonte: Os autores (2025).

Assim, as áreas com menores valores de CO₂flux correspondem a superfícies de vegetação senescente, estressada ou ocupações antrópicas com baixa

assimilação e maior probabilidade de emissão líquida de CO₂ (Rahman *et al.*, 2000). Em contraposição, os valores positivos refletem dosséis e fragmentos fisiologicamente mais ativos, com maior interceptação de radiação e eficiência fotoquímica, promovendo maior sequestro de carbono atmosférico (Gamon; Peñuelas; Field, 1992; Peñuelas; Filella, 1998; Huete *et al.*, 2002).

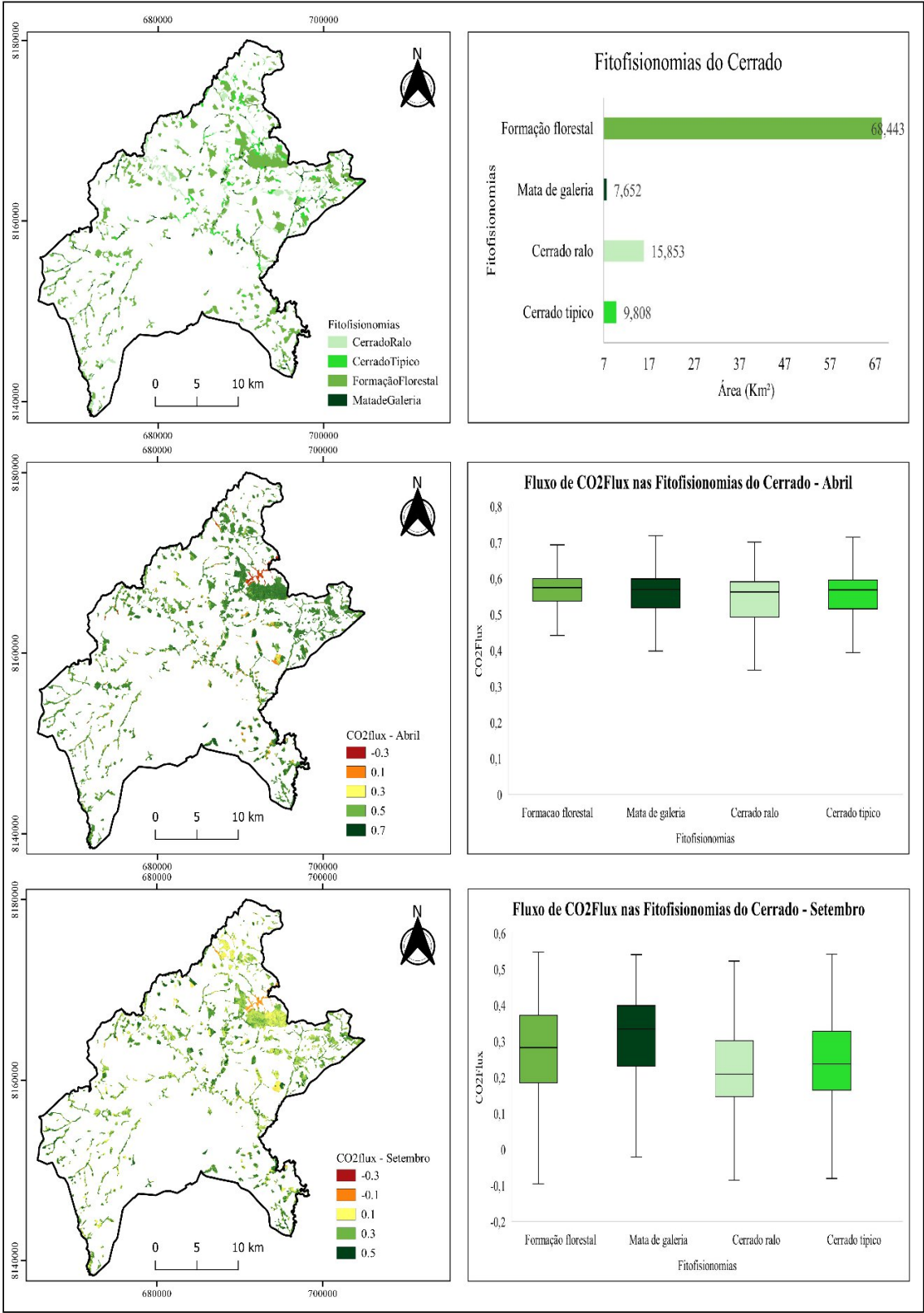
Outro aspecto relevante verificado é a existência de localidades com o NDVI alto e o sPRI baixo, possivelmente relacionada a vegetação (ou fitofisionomias) com baixa eficiência fotossintética ou pela presença de sombra ou falta de água no fim da estação seca. Por sua vez, também foram identificadas áreas com NDVI entre 0,2 e 0,4 e sPRI alto, supostamente referente a vegetação menos densa, mas com maior atividade fotossintética, como brotos de plantas herbáceas que surgem no começo da seca. Isso revela que o fluxo de CO₂ está ligado não só à quantidade de plantas, mas também ao quanto essas plantas estão funcionando bem naquele momento. Por isso, destaca-se a importância de analisar os índices NDVI, sPRI e CO₂flux conjuntamente.

A Figura 4 demonstra a distribuição das principais fitofisionomias de vegetação remanescente do Cerrado em Goiânia, com predomínio da Formação florestal (68,4%), ocorrência de fragmentos de Cerrado ralo (15,8%) e Cerrado típico (9,8%) e presença de Mata de galeria (7,6%) associada aos canais de drenagem.

Também é possível perceber pela Figura 4 a variação espacial e sazonal do CO₂flux no contexto de cada uma dessas fitofisionomias de vegetação. Os gráficos que acompanham a representação cartográfica indicam que, no período chuvoso (abril), os valores de CO₂flux são consistentemente mais elevados em todas as classes, com medianas mais altas nas formações florestais e nas matas de galeria, seguidas por Cerrado típico e Cerrado ralo.

No fim da estação seca (setembro), há redução difusa das medianas, refletindo no maior estresse hídrico e senescência da vegetação, especialmente em áreas abertas e fragmentadas (Cerrado ralo e típico). As matas de galeria mantêm desempenho relativamente superior, possivelmente pela influência da umidade próxima corredores ripários e dos cursos d'água.

Figura 4 – Fitofisionomias do Cerrado em Goiânia e variação do CO₂flux por fitofisionomia (abril e setembro de 2024).



Fonte: Os autores (2025).

CONCLUSÕES

No Brasil, aproximadamente 73% das emissões de gases de efeito estufa no Brasil advém do desmatamento, da conversão de uso da terra e das práticas agrícolas (WWF- BRASIL, 2019). Por tal motivo, é fundamental o monitoramento e manutenção dos remanescentes de vegetação, especialmente de biomas historicamente mais degradados (Amazônia e Cerrado).

Nesse sentido, este trabalho teve caráter exploratório e buscou evidenciar o potencial de aplicação do método CO2flux derivado do processamento digital de imagens do satélite Sentinel 2A, para mensurar a variação espacial e sazonal do sequestro de carbono no município de Goiânia. Os dados demonstram a variação da biomassa verde ativa e da correspondente atividade fotossintética entre o período chuvoso e a estiagem, reforçando a influência da sazonalidade das chuvas no potencial de estoque de carbono. Ademais, foi possível constatar que a formação florestais e as matas de galeria tem maior capacidade de estoque de carbono, sobretudo no período chuvoso.

Do ponto de vista do manejo e do planejamento, os resultados apontam que a conservação e a recuperação de fragmentos florestais e de corredores de mata de galeria são estratégicas para sustentar o sequestro sazonal de carbono. Além disso, as áreas de cerrado típico e cerrado ralo, por apresentarem maior variabilidade intraanual e queda pronunciada na estiagem, devem ser priorizadas em ações de restauração e manejo adaptativo, com vistas à ampliação dos estoques e dos fluxos de carbono.

A metodologia se mostrou bastante promissora, com grande potencial para verificar o comportamento da vegetação durante diferentes períodos e contextos espaciais, possibilitando aplicabilidade em estudos complementares e correlatos. Entretanto, além da estimativa do sequestro de carbono pelo processamento digital de imagens de satélite, destaca-se a importância de protocolos de validação com medições de campo, para obter dados mais consistentes.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, J. R. R.; ROCHA, K. S. Aplicação dos índices de vegetação NDVI, PRI e CO₂ flux na caracterização da cobertura vegetativa da Área de Proteção Ambiental Raimundo Irineu Serra. In: SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS NO PANTANAL, 2018, Jardim, MS. **Anais...** São José dos Campos: INPE; Campinas: Embrapa, 2018. Disponível em: <https://www.geopantanal.cnptia.embrapa.br/Anais-Geopantanal/pdfs/p151.pdf> (geopantanal.cnptia.embrapa.br in Bing). Acesso em: 20 jul. 2025.

BALDOCCHI, D.; PEÑUELAS, J. The physics and ecology of mining carbon dioxide from the atmosphere by ecosystems. **Global Change Biology**, v. 25, n. 4, p. 1191-1197, 2019. <https://doi.org/10.1111/gcb.14559>.

BAPTISTA, G. M. M. Validação da modelagem de sequestro de carbono para ambientes tropicais de Cerrado por meio de dados AVIRIS e Hyperion. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11, 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003. p. 1037-1044. Disponível em: http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2002/09.07.21.45/doc/10_002.pdf (marte.dpi.inpe.br in Bing). Acesso em: 2003.

BUSTAMANTE, M. M. C.; NARDOTO, G. B.; SILVA, J. S. Potential impacts of climate change on the biogeochemistry of the Cerrado biome. **Brazilian Journal of Biology**, v. 72, n. 3, p. 709-722, 2012.

GAMON, J. A.; PEÑUELAS, J.; FIELD, C. B. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. **Remote Sensing of Environment**, v. 41, p. 35-44, 1992

HUETE, A. et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 195-213, 2002.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Regiões de influência das cidades: 2025. Rio de Janeiro: **IBGE**, 2020. 118 p.

IPCC. *Climate Change 2023: Synthesis Report. Summary for Policymakers*. Geneva: IPCC, 2023.

JARDIM, A. M. R. F. et al. Understanding interactive processes: a review of CO₂ flux, evapotranspiration and energy partitioning under stressful conditions in dry forest and agricultural environments. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 194, n. 10, p. 1-17, 2022.

LOPES, R. B.; MIOLA, D. T. B. Sequestro de carbono em diferentes fitofisionomias do Cerrado. **Synthesis: Revista Digital FAPAM**, v. 2, n. 2, p. 127-143, 2010.

LOPES, L. M.; ROMÃO, P. de A. Geomorfologia urbana da região metropolitana de Goiânia. **Guia de Excursões Centro-Oeste, SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA**. Goiânia, 2006.

NASCIMENTO, D. T. F. O clima de Goiânia (Goiás/Brasil) à luz das abordagens tradicional, dinâmica e geográfica da climatologia. **Geosul**, Florianópolis, v. 39, n. 91, p. 374-395, nov. 2024.

NASCIMENTO, D. T. F.; OLIVEIRA, I. J. de. Mapeamento do processo histórico de expansão urbana do município de Goiânia-GO. **GEOgraphia**, v. 17, n. 34, p. 141-167, 16 nov. 2015.

PEÑUELAS, J.; FILELLA, I. Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status. **Trends in Plant Science**, v. 3, p. 151-156, 1998.

RAHMAN, A. F. et al. Modeling CO₂ flux of boreal forests using narrow-band indices from AVIRIS imagery. In: AVIRIS WORKSHOP, 2000, Pasadena. **Proceedings...** Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, NASA, 2000. 8 p.

RIBEIRO, M. E. J. **Goiânia**: os planos, a cidade e o sistema de áreas verdes. Goiânia: Editora da UCG, 2004.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE-1 SYMPOSIUM, 3. 1973, Washington, DC. **Proceedings...** Washington, DC: NASA, 1973. (NASA SP-351, v. 1). p. 309-317.

VIGANÓ, H. A.; BORGES, E. F.; FRANCA-ROCHA, W. J. S. Análise do desempenho dos Índices de Vegetação NDVI e SAVI a partir da imagem Aster. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15. 2011. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. p. 1828-1834.

WWF-BRASIL. **O Cerrado**: a savana de maior biodiversidade do mundo. Brasília: WWF-Brasil, 2019. Disponível em: https://wwfbrnew.awsassets.panda.org/downloads/wwf__casesptfinal_compressed__1_.pdf. Acesso em: 20 jul. 2025.