



Análise temporal do índice CO₂flux na vegetação ripária do reservatório Jacareí-Jaguari em São Paulo

Temporal analysis of the CO₂flux index in the riparian vegetation of the Jacareí-Jaguari reservoir in São Paulo

Fernando Yogi 

Engenheiro Civil e Mestre em Sustentabilidade Ambiental
Universidade Federal de São Carlos, São Paulo, Brasil
e-mail, fyogi@hotmail.com

Fabio Stanganini 

Engenheiro Civil e Mestre em Engenharia Urbana
Universidade Federal de São Carlos, São Paulo, Brasil
e-mail, fstanganini@ufscar.br

Breno Malheiros de Melo 

Geógrafo e Doutor em Engenharia Urbana
Universidade Federal de São Carlos, São Paulo, Brasil
e-mail, breno.malheiros@estudante.ufscar.br

Resumo

O monitoramento ambiental por meio de imagens de satélite é essencial para a compreensão das mudanças de uso e ocupação do solo ao longo do tempo. Este estudo teve como objetivo analisar a dinâmica de uso e ocupação do solo, associando-a ao fluxo de CO₂ nas classes pertencentes à área da represa Jacareí-Jaguari ao longo de 2023. Utilizou-se a Coleção 09 do MapBiomas e imagens de alta resolução do satélite Planet. Foram selecionadas imagens, uma por mês, para uma análise temporal que visa verificar a compatibilidade dos dados coletados com os da Coleção 09. A análise foi realizada no Google Earth Engine (GEE) com amostras de cada classe identificada na área da represa, com enfoque no comportamento de índices de vegetação nas diferentes classes de uso do solo em 2023, e determinando o fluxo de CO₂ com base em índices vegetativos: Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), Índice de Reflectância Fotoquímica (PRI) e Índice de Reflectância Fotoquímica Escalonado (sPRI). A represa exibiu um índice de CO₂ que variou entre -0,6917 e 0,6604. A represa apresentou fluxo de CO₂ baixo devido à predominância da classe "água", mas é capaz de indicar áreas deficientes de vegetação.



<https://doi.org/10.28998/contegeo.10i.24.19236>

Artigo publicado sob a Licença Creative Commons 4.0

Submetido em: 19/02/2025

Aceito em: 18/10/2025

Publicado: 16/12/2025

e-Location: 19236

Contexto Geográfico | Maceió | v. 10, n. 24 | pág. 476 - 501 | Dez/2025

476

Palavras-chave: Monitoramento ambiental; Processamento de dados geospaciais; Mudança de Uso do solo; Índices de vegetação; Emissões de CO₂.

Abastracn

Environmental monitoring through satellite images is essential for understanding changes in land use and occupation over time. This study aimed to analyze the dynamics of land use and occupation, associating it with CO₂ flux in the classes belonging to the Jacareí-Jaguari reservoir area throughout 2023. Collection 09 from MapBiomass and high-resolution images from the Planet satellite were used. Images were selected, one per month, for a temporal analysis that aims to verify the compatibility of the collected data with those from Collection 09. The analysis was carried out in Google Earth Engine (GEE) with samples from each class identified in the reservoir area, focusing on the behavior of vegetation indices in the different land use classes in 2023, and determining the CO₂ flux based on vegetation indices: Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Photochemical Reflectance Index (PRI), and Scaled Photochemical Reflectance Index (sPRI). The reservoir exhibited a CO₂ index that ranged from -0.6917 to 0.6604. The reservoir showed low CO₂ flux due to the predominance of the "water" class, but it is capable of indicating areas deficient in vegetation.

Keywords: Environmental monitoring; Geospatial data processing; Vegetation indices; Land use change; CO₂ Emissions.

INTRODUÇÃO

O aquecimento global, intensificado pela retenção de calor causada por gases de efeito estufa como dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O), tem provocado impactos diretos sobre a infraestrutura urbana, especialmente em regiões vulneráveis. No Brasil, eventos climáticos extremos — como chuvas intensas, secas prolongadas e ondas de calor — têm causado prejuízos significativos à saúde pública, à segurança hídrica e à estabilidade econômica das cidades. A crise hídrica de 2014, por exemplo, comprometeu a geração de energia elétrica no Sistema Cantareira, reduzindo o rendimento das usinas hidrelétricas e provocando conflitos pelo uso múltiplo da água (CÔRTES, 2017).

As mudanças climáticas também têm implicações econômicas profundas. Segundo a EMBRAPA (2008), o aquecimento global pode reduzir a riqueza pessoal global em até 40% até 2100. No Brasil, a agricultura é particularmente afetada, com secas prolongadas prejudicando a produção de alimentos e elevando os preços de produtos essenciais como café e laranja. Além disso, o IPCC (2023) afirma que a conversão de florestas em áreas agrícolas e de pastagem representa uma das principais fontes de emissão de CO₂ no país, com cerca de 39 bilhões de toneladas

emitidas entre 1990 e 2014. Conforme Quintão et al. (2021), a conversão de vegetação nativa para agricultura foi responsável por 41% das emissões líquidas de CO₂ do setor de uso da terra entre 2010 e 2016. Mundialmente, Azevedo et al. (2018) elenca a mudança como a segunda maior fonte de emissões de CO₂, logo após a queima de combustíveis fósseis.

Para monitorar e compreender melhor o ciclo do carbono, tecnologias como sensoriamento remoto e ferramentas computacionais têm sido essenciais. Ferramentas como o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index, traduzido para o português como Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) e o PRI (Photochemical Reflectance Index, traduzido como Índice de Reflectância Fotoquímica) são amplamente utilizadas para monitorar a saúde da vegetação, estimar a biomassa vegetal e avaliar o sequestro de carbono em diferentes ecossistemas (BENAVIDES et al., 2024; COSTA, 2018; NOVO, 2005; POLINO et al., 2015).

Nesse contexto, o reflorestamento e a recuperação de áreas degradadas surgem como estratégias eficazes para promover o sequestro de carbono e mitigar os efeitos das mudanças climáticas. Essas práticas aumentam a capacidade das florestas de absorver CO₂ da atmosfera, contribuindo para a redução do aquecimento global. Conforme o Projeto MapBiomas - Coleção 9 da série anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil, o mapeamento vegetativo de lavouras, pastagens, florestas e áreas degradadas, com o uso de tecnologias como sensoriamento remoto e rotinas computacionais, tem se mostrado essencial para orientar ações de restauração ambiental e planejamento territorial.

Ferramentas de Análise e Monitoramento

O GEE utiliza o padrão Web Map Service (WMS) para a visualização de imagens de sensores, permitindo a criação de mapas georreferenciados e animações de séries temporais. Esse padrão facilita a interpretação visual dos dados, tornando o GEE uma ferramenta poderosa para estudos ambientais, meteorologia, climáticos e topográficos. A plataforma disponibiliza uma enorme quantidade de dados georreferenciados, incluindo imagens de satélites e sensores aéreos. Para maximizar o uso das funcionalidades do GEE, é necessário ter conhecimento em Python e JavaScript, além das bibliotecas associadas (GORELICK et al., 2018).

O GEE tem demonstrado um grande potencial em diversas áreas da ciência da terra, como agricultura, monitoramento de cheias, detecção de espelhos d'água e análise de mudanças no uso do solo, através de sua linguagem orientada a objetos, Python e JavaScript (GORELICK et al., 2018).

Levantamentos temporais realizados por meio de Sensoriamento Remoto e geoprocessamento, aliados à análise evolutiva do uso e ocupação do solo, destacam-se como ferramentas eficazes para quantificar dados no GEE, como o fluxo de CO₂. Esses métodos oferecem vantagens em relação aos levantamentos tradicionais que dependem da coleta de métricas vegetativas in situ para estimar a biomassa seca.

Com uma interface em linguagem Python que facilita a consulta e extração de dados, o GEE permite o processamento de informações em praticamente todas as regiões do planeta, inclusive em altas latitudes. A análise de séries temporais viabiliza o monitoramento contínuo das mudanças no uso e ocupação do solo, aspecto essencial para a gestão de áreas verdes e recursos naturais. A plataforma disponibiliza uma ampla variedade de bibliotecas de imagens de sensores orbitais, o que simplifica o acesso, o processamento e a visualização dos resultados.

Em estudos que envolvem diferentes sistemas de satélites e índices de vegetação, destaca-se o PRI, que apresenta potencial para medir a eficiência do uso da luz pela vegetação, especialmente em sua versão escalonada, o sPRI (RAHMAN, 2001). Segundo Yang et al. (2023), a avaliação das emissões de CO₂ exige considerar a dinâmica do uso e ocupação do solo, os estoques de carbono e as respostas às mudanças na cobertura vegetal. A construção de modelos precisos depende da integração de múltiplas variáveis e de um tratamento estatístico robusto, dada a alta variabilidade espectral entre as classes mapeadas.

O uso de ferramentas de sensoriamento remoto, como o MapBiomass e imagens de satélite, permite um monitoramento mais detalhado dessas áreas e do uso e ocupação do solo nas regiões adjacentes à represa. MapBiomass é um projeto colaborativo que mapeia a cobertura e o uso da terra no Brasil desde 1985, oferecendo uma visão histórica detalhada das mudanças na cobertura do solo (MAPBIOMAS, 2024).

Por outro lado, o sistema Planet consiste em uma constelação de satélites que fornecem imagens de média resolução da Terra diariamente, capturando mudanças rápidas e detalhadas na superfície terrestre. As imagens do satélite Planet oferecem uma perspectiva mais imediata e precisa das alterações no uso e ocupação do solo. A

integração dessas imagens com os dados históricos do MapBiomas permite um monitoramento abrangente e contínuo das áreas de interesse, essencial para a gestão dos recursos hídricos e conservação ambiental. Além disso, o NICFI (na sigla em inglês para Norwegian International Climate and Forest Initiative), em parceria com o sistema Planet, fornece imagens de média resolução para monitorar florestas tropicais, reduzir emissões e prevenir desmatamento e degradação florestal.

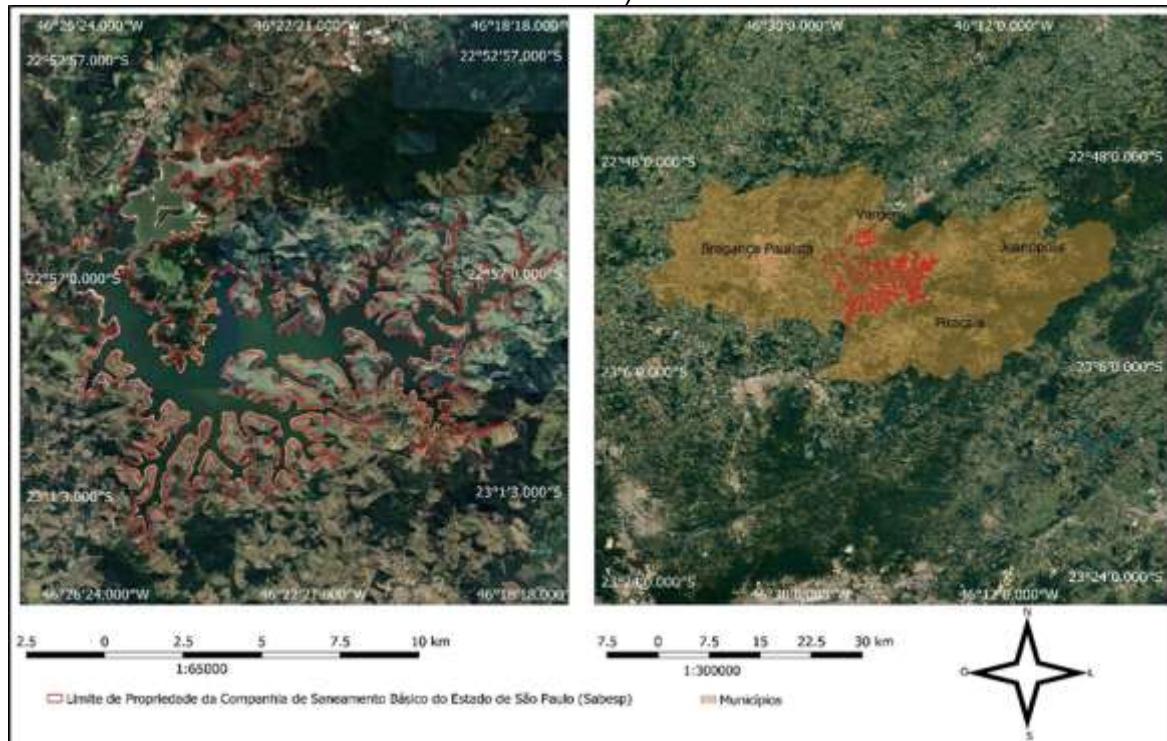
A vegetação do entorno da represa Jacareí-Jaguari, parte do Sistema Cantareira, desempenha papel estratégico no abastecimento de água da Região Metropolitana de São Paulo. O monitoramento dessas áreas com índices espectrais e imagens de satélite é fundamental para garantir a conservação dos recursos hídricos e a resiliência ecológica frente às mudanças climáticas. A vegetação ripária, por exemplo, atua como uma barreira natural contra a erosão e contribui para a regulação do regime hidrológico, sendo essencial para a manutenção da qualidade e quantidade da água disponível (PASTORE e HEPP, 2020).

O presente estudo buscou investigar o comportamento das classes de uso e ocupação do solo ao longo de 2023 na área da represa Jacareí-Jaguari, por meio da combinação de dados da Coleção 09 do MapBiomas e imagens de média resolução do satélite Planet, associando-os ao fluxo de carbono. Foi criada uma rotina computacional para o tratamento das imagens e aplicação dos índices vegetativos, como o NDVI, o PRI e o sPRI.

MATERIAIS E MÉTODOS

A represa Jacareí-Jaguari (Figura 1), localizada a cerca de 70 km da capital paulista, desempenha um papel fundamental no abastecimento de água para a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). Essa represa faz parte do Sistema Cantareira, o maior sistema de abastecimento de água da região, responsável por fornecer água para aproximadamente 14 milhões de pessoas, o que corresponde a cerca de 67% da população da RMSP (SABESP, 2022). A represa é crucial para manter o nível da água e facilitar a transferência para a Estação Elevatória de Santa Inês, garantindo o fornecimento contínuo de água para a região.

Figura 1 - Localização da Represa Jacareí-Jaguari em nível local (à esquerda) e municipal (à direita).



Fonte: Yogi et al. (2023).

O limite da represa foi obtido a partir dos dados topográficos disponibilizados pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), considerando a cota de extravasamento de 844 m. Uma vez definido o limite da represa, as bandas espectrais obtidas a partir do Sistema Planet foram recortadas para utilização na geração dos índices NDVI e PRI.

Sistema NCIFI PLANET

As imagens obtidas da área de estudo são provenientes do sistema Planet, geradas sistematicamente a partir das imagens diárias PlanetScope, coletada as melhores imagens, ao longo de todo os doze meses de 2023. Para isso, aplicaram-se algoritmos com filtros para o tratamento de imagens com nuvens, que selecionam as melhores cenas para gerar dados de média resolução, homogêneos e que cobrem toda a região de floresta tropical.

Determinação do Potencial de Fluxo de CO₂ por intermédio de índices espectrais

O potencial de fluxo de CO₂ refere-se à capacidade de uma área ou sistema de emitir ou absorver dióxido de carbono (CO₂) ao longo do tempo. Este conceito é crucial para entender as dinâmicas de carbono em diferentes ecossistemas e avaliar o impacto das mudanças no uso do solo e na cobertura vegetal sobre as emissões de CO₂ (JIN et al. 2024).

Para a análise do potencial de fluxo do dióxido de carbono presente na área de estudo, foram adquiridas imagens do Sistema Planet (NICFI) em vários comprimentos de ondas do espectro eletromagnético. Essa coleção de imagens fornece acesso ao monitoramento por satélite de média resolução, tendo como objetivo principal reduzir e reverter a perda de florestas tropicais, combater a mudança climática e conservar a biodiversidade.

As imagens disponibilizam 4 bandas com resolução espacial de 4,77 m: infravermelho próximo (NIR, sigla de origem inglesa de Near Infrared), vermelho (R, sigla de origem inglesa de Red), verde (G, sigla de origem inglesa de Green) e azul (B, sigla de origem inglesa de Blue). Essas bandas são utilizadas para gerar os índices NDVI, PRI e o índice do potencial de fluxo de dióxido de carbono (CO₂flux).

Primeiramente foi realizado o cálculo do NDVI para estimar a biomassa fotossinteticamente ativa e, posteriormente, relacioná-lo ao estoque de carbono. As bandas espectrais utilizadas foram a banda que expressa a absorção da clorofila pela banda R e a banda NIR, em virtude da vegetação que possui alta reflectância interna das folhas no infravermelho próximo. Esse índice é calculado pela relação entre o vermelho e o infravermelho próximo expresso na Equação 1. Os resultados do NDVI é um índice adimensional que varia entre -1 a 1, onde, quanto mais próximo de 1, maior é a ação fotossintética da vegetação (Pereira et al., 2020).

$$\text{NDVI} = (\text{NIR}-\text{V})/(\text{NIR}+\text{V}) \quad (1)$$

Logo em seguida foi calculado o PRI, que tem como objetivo verificar as alterações nos pigmentos de carotenoides na folhagem. Esses pigmentos são indicativos de que houve eficiência no uso da luz fotossintética ou na taxa de dióxido de carbono armazenada pela folhagem. Este índice (Equação 2) é utilizado para estudos sobre

estresse vegetal e produtividade, sendo calculado com base na diferença entre as reflectâncias nas bandas B e G do espectro visível, com resultados variando entre -1 e 1.

$$\text{PRI} = (B-G)/(B+G) \quad (2)$$

Então, é necessário ajustar os valores do PRI para um intervalo positivo, gerando assim o índice sPRI (3). O PRI é um índice normalizado semelhante ao NDVI, e seus valores variam entre -1 e 1. Como é utilizado como fator de eficiência, deriva-se um valor escalonado de PRI (sPRI) para um intervalo ajustado de 0 a 1.

$$\text{sPRI} = (\text{PRI}+1)/2 \quad (3)$$

Com o sPRI é possível realizar uma operação matricial com o NDVI utilizando a fórmula proposta por Rahman et al. (2000) para determinar o índice CO₂flux (4), que mede o potencial de sequestro de dióxido de carbono por vegetação ativa na fotossíntese. Quanto maior o índice, maior a capacidade da vegetação de capturar carbono.

$$\text{CO}_2 \text{ flux} = \text{sPRI} \times \text{NDVI} \quad (4)$$

A série temporal de dados dos satélites proporcionou a análise dos índices de vegetação mencionados. A série temporal do NDVI indica onde e quando a vegetação está mais vigorosa. O intervalo da análise temporal compreendeu todas as passagens do satélite do Sistema Planet NICFI no ano de 2023, utilizando imagens mensais com a menor incidência de nuvens. A quantidade de imagens disponíveis para áreas de Florestas Intertropicais inviabiliza o download manual e a organização como arquivos. Logo, optou-se pela análise temporal com processamento de imagens em nuvem no GEE, auxiliado por arquivos de animações e análise gráfica que ajudaram na avaliação dos índices de vegetação.

Nesse contexto, é viável criar um navegador de mapas no formato web, combinando o padrão WMS com recursos modernos de navegadores, para realizar análises de séries temporais. A criação de séries temporais, entretanto, pode demandar considerável tempo de processamento devido a etapas de recorte repetitivas e transformações espectrais que alteram as estatísticas de classes, acumulando erros.

A extração de um perfil temporal de uma posição no espaço requer a consulta e análise de um subconjunto da extensa lista de arquivos. Portanto, a organização e indexação dos dados de Sensoriamento Remoto (SR) são necessárias para formular consultas espaço-temporais com facilidade. Isso pode ser alcançado através da organização dos dados de forma a permitir a extração eficiente de um subconjunto em

crescimento contínuo, mantendo uma convenção radiométrica de bandas espectrais e reduzindo redundâncias para aumentar a rapidez e a capacidade de armazenamento.

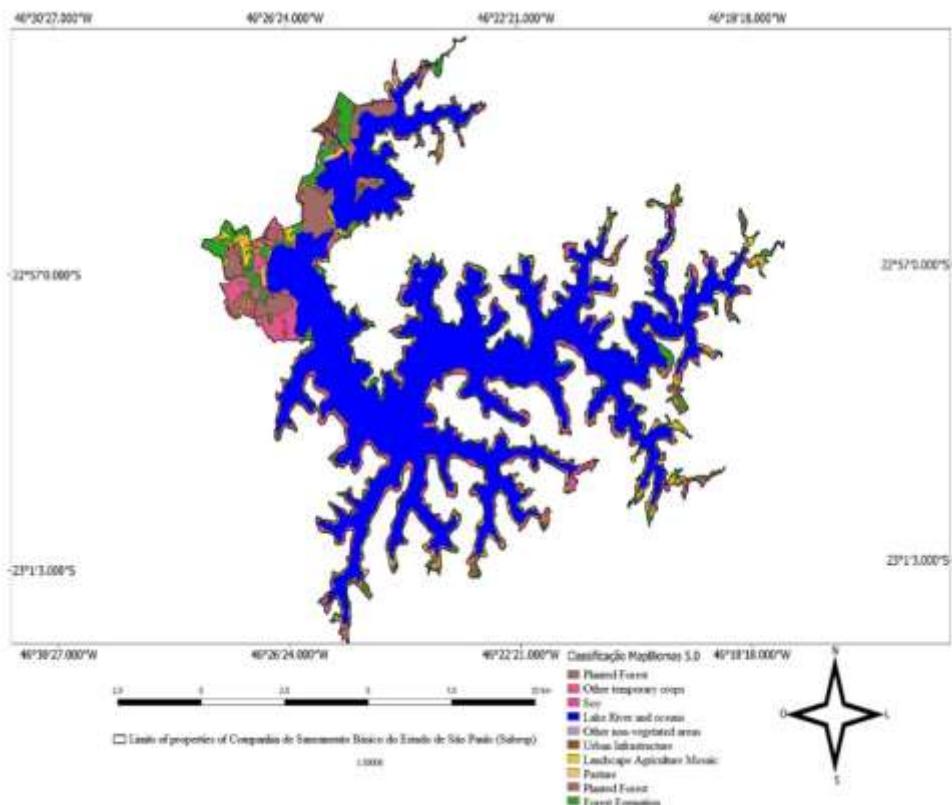
Pela resolução disponível (4,77 m) das imagens geradas para os índices de vegetação, o mapeamento e a análise do fluxo de CO₂ de qualquer área vegetada superior a 22,76 m² poderão ser realizados, desde que o solicitante disponibilize a camada vetorial dos limites do contorno. Essa camada pode ser obtida por meio de aplicações desenvolvidas para realizar análises geoespaciais, que permitem aos usuários processar grandes volumes de dados de satélite e criar visualizações interativas que auxiliam na análise de cada um dos índices de vegetação. Além disso, essas aplicações possuem forte potencial para o desenvolvimento de previsões e indicadores nas áreas vegetadas, bem como análises detalhadas, como classificação de uso do solo, detecção de mudanças e modelagem de fluxos de carbono.

A construção de uma rotina para o tratamento de séries de dados de sistemas orbitais, objetivando torná-la automática, envolve a criação de um aplicativo em linguagens computacionais Python e JavaScript. Esse aplicativo otimiza os dados para o cálculo do fluxo de CO₂, organizando-os de forma eficiente e mantendo o produto atualizado com as cenas mais recentes. A abordagem com Python permite a criação de scripts que automatizam o download, processamento e análise de grandes volumes de dados de satélite.

A análise consistiu inicialmente na classificação do uso e ocupação do solo (Figura 2), utilizando os dados da Coleção 09 do MapBiomas por meio do GEE. As classes identificadas foram posteriormente segmentadas no software QGIS, versão 3.28 Firenze, desenvolvido pela QGIS Development Team (2022), criando-se vetores separados para cada categoria. Esses vetores foram utilizados como ativos (assets) no GEE para a aplicação dos índices espectrais NDVI, PRI e sPRI, bem como para o cálculo do CO₂flux, permitindo a análise da dinâmica vegetacional e do sequestro de carbono.

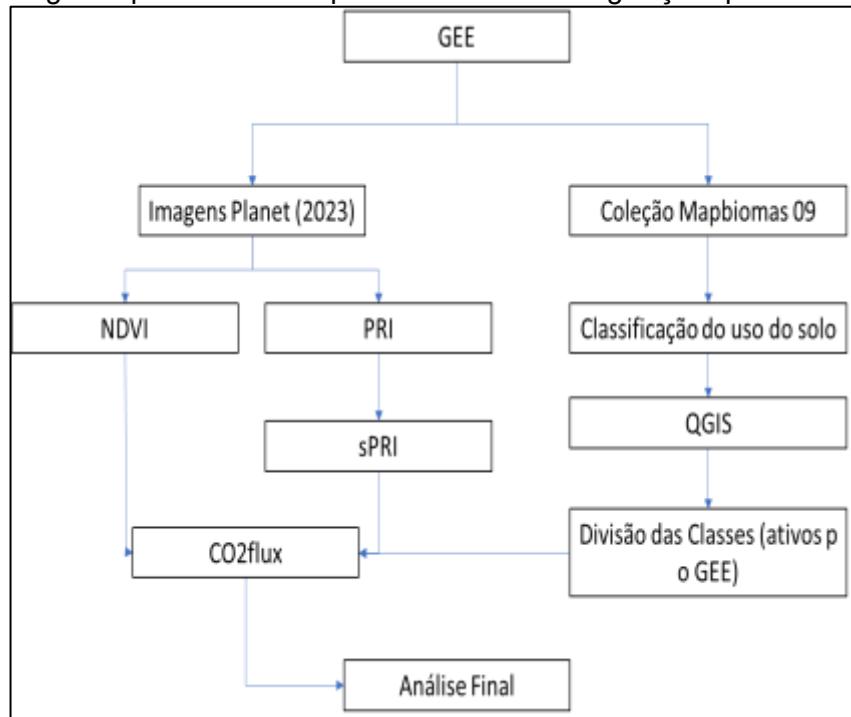
A rotina computacional, desenvolvida com linguagem orientada a objetos (Figura 3) foi disponibilizada aos clientes por meio de aplicativos criados pelo autor na plataforma do GEE, acessíveis por URLs.

Figura 2 - Uso e ocupação do solo no entorno da represa Jacareí-Jaguari.



Fonte: Yogi et al. (2023).

Figura 3.- Fluxograma para análise temporal de CO₂flux da vegetação ripária do Jacareí-Jaguarí



Organiza o: Autores (2024).

Por fim, a rotina computacional foi ajustada para exportar 12 imagens com quatro bandas representando um dos índices (NDVI, PRI, sPRI, CO₂flux). A análise permitiu observar, mês a mês, o comportamento mínimo e máximo do CO₂flux para a camada completa da área de interesse, que corresponde ao reservatório Jacareí-Jaguari.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

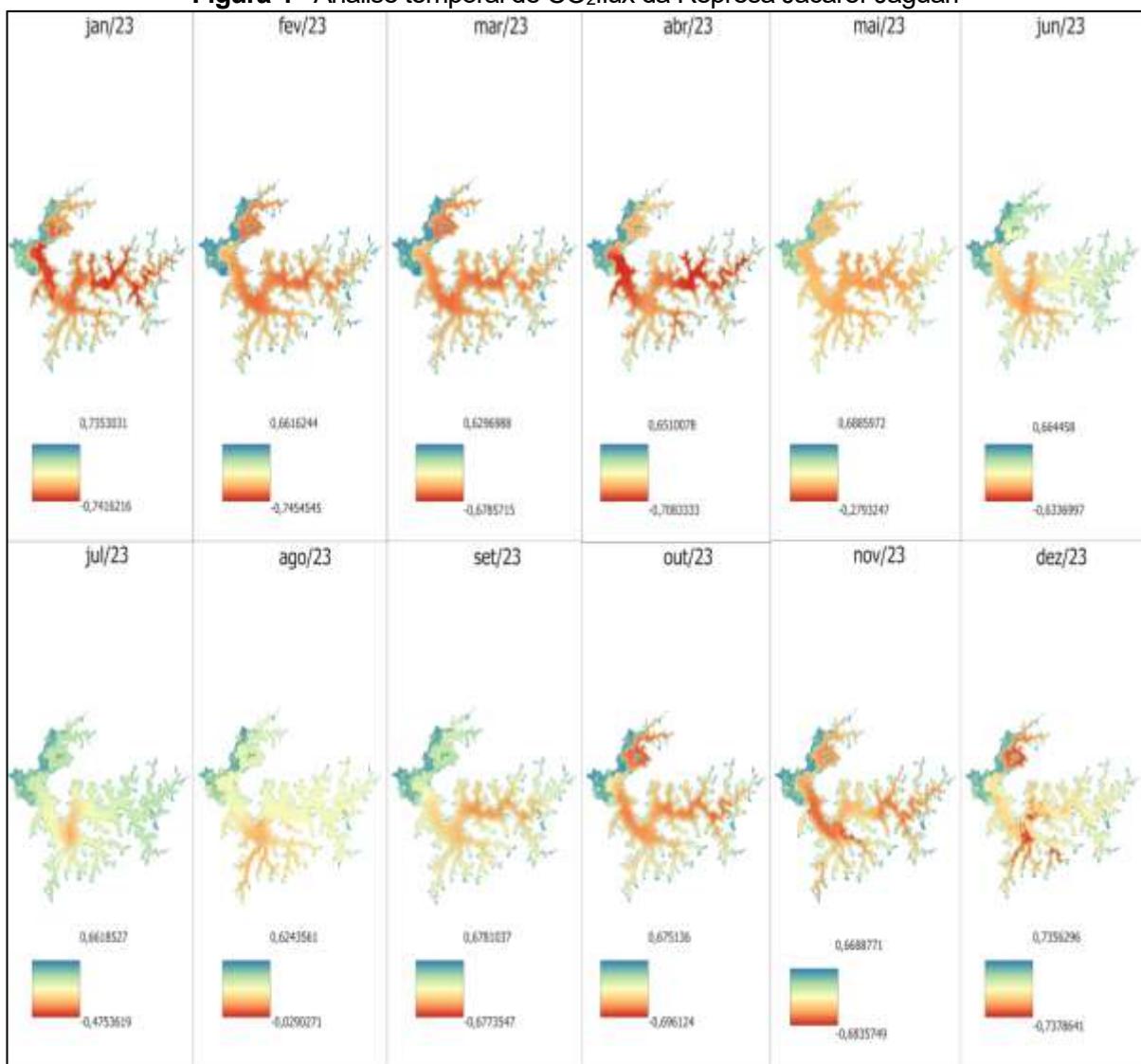
Utilizando a Coleção 09 do MapBiomas e considerando o limite territorial da propriedade em seu nível mais alto, de extravasamento, a área pertencente à SABESP (Figura 2) abrange 64.692 km². Esta área é composta por diferentes tipos de cobertura e uso do solo, incluindo formações florestais, florestas plantadas, pastagens, mosaicos agrícolas, infraestrutura urbana, outras áreas sem vegetação, corpos d'água além de culturas não temporárias. A distribuição dessas categorias na área total conforme Yogi et al. (2023) é de 7,04% para formações florestais, 4,03% para florestas plantadas, 3,66% para pastagens, 7,83% para mosaicos paisagísticos agrícolas, 0,26% para infraestrutura urbana, 0,10% para outras áreas sem vegetação, 64,01% para rios, lagos e oceanos, e 13,06% para outras culturas não temporárias. A partir dessas classes, realizou-se a amostragem de aproximadamente 10 pontos por cada feição identificada (Figura 4) para verificar o comportamento temporal dos índices de vegetação e do fluxo de carbono (CO₂flux) ao longo dos 12 meses de 2023.

Os índices NDVI, PRI, sPRI e CO₂flux foram calculados e organizados (Figura 5) para cada uma das classes, permitindo uma análise detalhada das variações ao longo do tempo. O comportamento de cada índice foi visualizado com a adição das camadas ao mapa no GEE, permitindo verificar os valores mínimos e máximos de CO₂flux para cada classe de uso do solo.

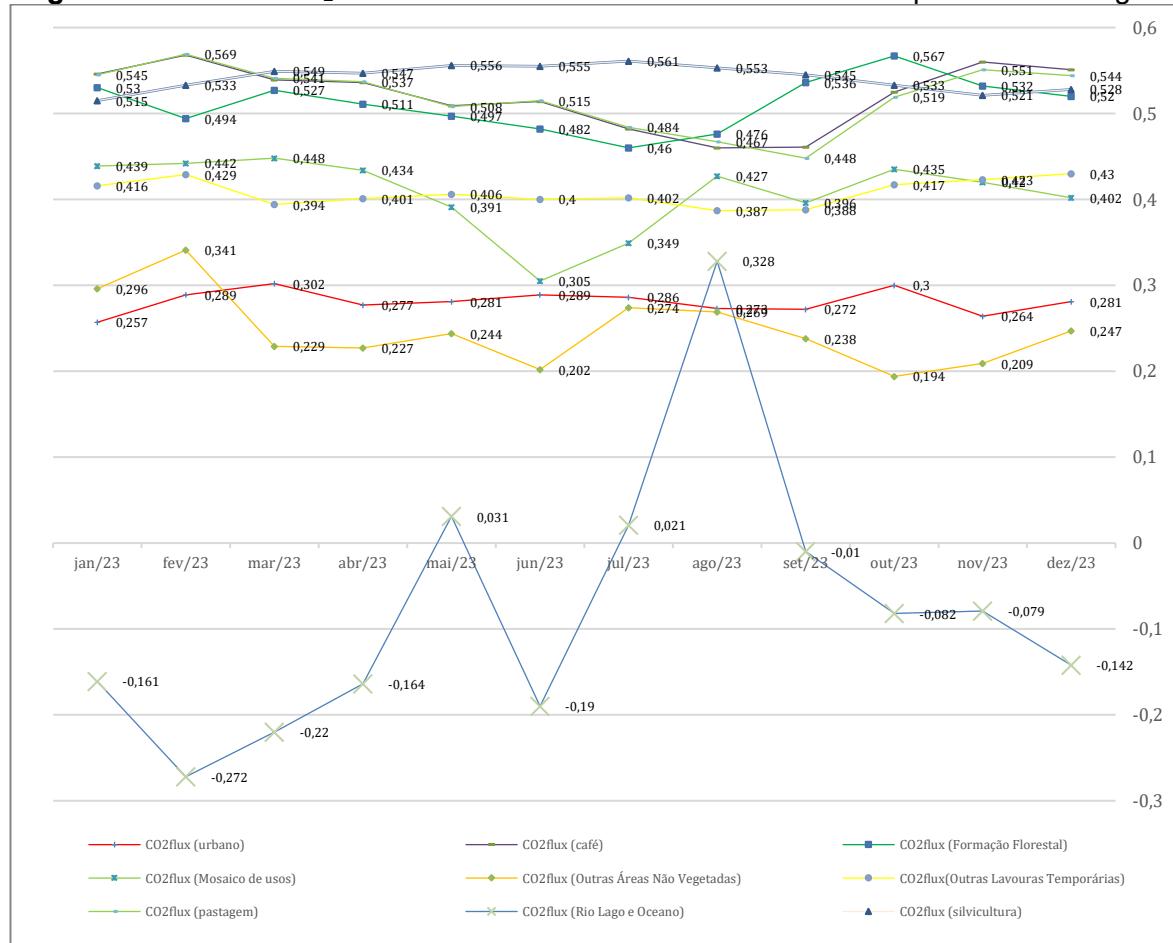
Os valores mais altos de CO₂flux observados na classe café nos meses de janeiro (0,546) e fevereiro (0,568) sugerem um acúmulo maior de carbono no início do ano, o que pode estar diretamente relacionado ao ciclo fenológico da planta, especialmente à fase de granação dos frutos, quando há intensa atividade fotossintética. Essa dinâmica é coerente com os resultados apresentados por Carducci et al. (2023), que analisaram o balanço de carbono em sistemas de produção cafeeira no Cerrado Mineiro. O estudo demonstrou que práticas conservacionistas, como cobertura vegetal permanente e

manejo adequado do solo, favorecem o sequestro de carbono, especialmente em períodos de maior vigor vegetativo. A queda gradual do CO₂flux a partir de março, atingindo o valor mais baixo em agosto (0,460), pode refletir a transição para fases de menor atividade metabólica, como maturação e senescência, também discutidas pelos autores como momentos de menor eficiência no acúmulo de carbono. Assim, os dados observados reforçam a importância de considerar o ciclo fenológico e o manejo agrícola na avaliação da dinâmica de carbono em sistemas cafeeiros.

Figura 4 - Análise temporal de CO₂flux da Represa Jacareí-Jaguari



Organização: Autores (2024).

Figura 5 - Índices de CO₂flux em 2023 das classes de uso ao redor da Represa Jacareí-Jaguarí

Organização: Autores (2024).

A variação do CO₂flux observada na formação florestal ao longo do ano, com um pico em janeiro (0,530), uma leve redução em fevereiro (0,494) e um novo aumento até atingir o valor máximo em outubro (0,567), pode ser interpretada à luz do explorado por Aguirre-Gutiérrez et al. (2025). Os autores analisaram traços funcionais do dossel em florestas tropicais de diferentes continentes, demonstrou que a resposta da vegetação ao clima é altamente dependente de características locais, como disponibilidade hídrica e estratégias adaptativas das variadas espécies. A capacidade de recuperação observada após o período seco de agosto, refletida no aumento do CO₂flux em outubro, está alinhada com o estudo, em que florestas tropicais possuem mecanismos fisiológicos que permitem retomar rapidamente a atividade fotossintética após estresses climáticos. Isso reforça a resiliência dessas formações vegetais e sua importância no sequestro contínuo de carbono, mesmo em contextos de variação sazonal acentuada.

No caso do mosaico de usos, que combina diferentes formas de ocupação do solo, foi observada uma oscilação nos valores de CO₂flux ao longo do ano. O valor máximo foi registrado em março (0,448), seguido por uma queda até junho (0,305), com recuperação gradual a partir de julho, culminando em outubro (0,435). Esse comportamento pode ser interpretado como uma resposta da vegetação ao período seco, sendo compatível com o que foi descrito por Magalhães et al. (2023), em estudo realizado na Região de Integração do Caeté no estado do Pará, onde variações sazonais do CO₂flux foram atribuídas à dinâmica da vegetação em áreas de uso misto. Já nas lavouras temporárias, uma maior estabilidade nos valores de CO₂flux foi registrada, com variações leves entre 0,387 em agosto e 0,430 em dezembro. Esse padrão foi associado ao crescimento vegetativo das culturas, conforme discutido por Caetano (2022), que identificou maior atividade fotossintética durante o período chuvoso em áreas agrícolas da Caatinga baiana. A influência do tipo de uso do solo e da sazonalidade sobre o sequestro de carbono também foi analisada por Pereira (2018), cuja pesquisa demonstrou que sistemas agrícolas diversificados apresentam maior capacidade de recuperação após o estresse hídrico, reforçando a interpretação dos dados observados.

O comportamento distinto do CO₂flux na classe água, com valores negativos nos primeiros meses do ano — como o registrado em fevereiro (-0,272) — seguido por uma inversão para valores positivos a partir de maio, como em agosto (0,328), pode ser compreendido à luz de estudos que investigam a dinâmica do carbono em ecossistemas aquáticos tropicais, como o levantamento feito por Marrota et al. (2008), os ecossistemas aquáticos continentais, apesar de ocuparem pequena área, desempenham papel relevante no ciclo global do carbono. Durante períodos de baixa produção primária, como no início do ano, a decomposição da matéria orgânica aquática — especialmente de macrófitas — tende a liberar CO₂ para a atmosfera, caracterizando os corpos d'água como emissores. Já em períodos de maior colonização por vegetação aquática, como ocorre após o início da estação chuvosa, há aumento da atividade fotossintética, o que pode explicar os valores positivos de CO₂flux observados posteriormente, indicando absorção de carbono.

Complementarmente, Ferreira (2023) reforça que fatores como heterotrofia do metabolismo aquático, metanogênese e trocas gasosas na interface ar-água influenciam diretamente as emissões de carbono. Em ambientes tropicais, a sazonalidade e a

qualidade da água — incluindo profundidade, pH e oxigênio dissolvido — modulam essas emissões, podendo resultar em variações como as observadas nos seus dados.

Além disso, Enrich-Prast et al. (2009) discutem que lagos e rios tropicais podem atuar simultaneamente como emissores e sequestradores de carbono, dependendo da dinâmica da matéria orgânica e da vegetação presente. Essa dualidade é compatível com a inversão de sinal do CO₂flux ao longo do ano, como evidenciado no trabalho do autor e observado o comportamento de CO₂flux nos meses de fevereiro e agosto.

A análise do NDVI (Figura 6), que mede a densidade da vegetação, complementa as observações sobre o fluxo de carbono. Na classe café, o NDVI atingiu seus valores mais altos nos primeiros meses do ano, como 0,808 em janeiro e 0,833 em fevereiro, refletindo uma vegetação densa e vigorosa. A partir de julho, o índice declina, chegando ao ponto mais baixo em agosto e setembro, meses que coincidem com o período de colheita e diminuição na densidade foliar das plantas. Entretanto, nos meses finais do ano, o NDVI volta a subir, refletindo uma recuperação da vegetação.

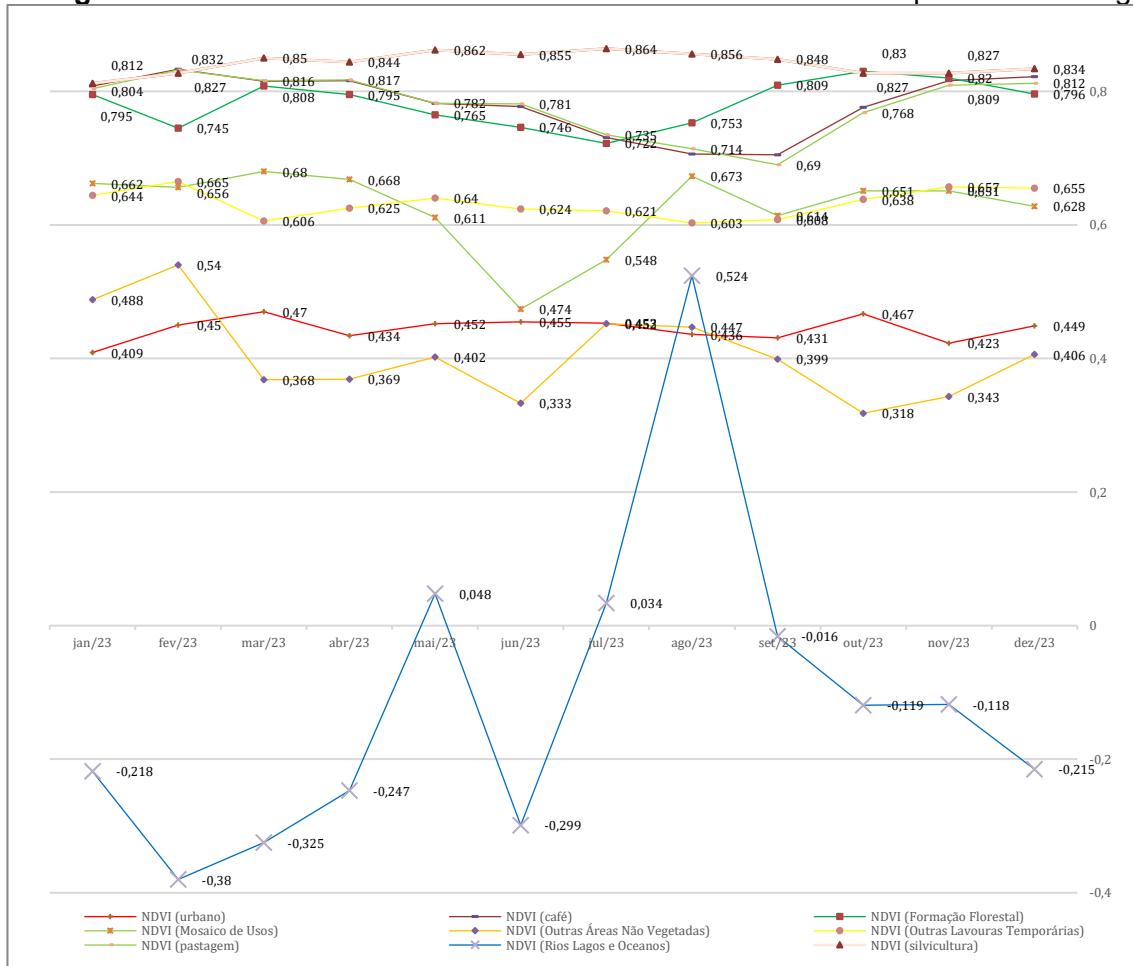
Nas formações florestais, os valores elevados de NDVI entre março e outubro, superiores a 0,800, indicam alta densidade de biomassa e vigor vegetativo, mesmo durante os meses de seca. Esse comportamento foi analisado por Neves et al. (2023), que utilizaram o NDVI para avaliar a dinâmica da vegetação em áreas florestadas em Minas Gerais, correlacionando-os à processos erosivos na região, demonstrando que mesmo em períodos de estresse hídrico, a vegetação arbórea mantém níveis elevados de reflectância no infravermelho próximo, associados à estrutura foliar e à capacidade de retenção hídrica. Gamarra et al. (2016) também destacaram que o NDVI é eficaz para inferir a complexidade estrutural e a heterogeneidade ambiental de formações florestais, reforçando sua utilidade como indicador de conservação e produtividade.

No mosaico de usos, a queda acentuada do NDVI durante os meses secos, como junho (0,474), seguida de recuperação em agosto (0,673), pode ser explicada pela resposta da vegetação herbácea e agrícola às variações climáticas. Silva & Souza (2024), ao analisarem áreas úmidas na Chapada do Araripe, região que abrange os estados do Ceará, Pernambuco e Piauí - observaram que a vegetação adaptada a ambientes sazonalmente alagados apresenta recuperação rápida após o retorno das chuvas, o que se reflete nos índices de vegetação.

Nas lavouras temporárias, a estabilidade do NDVI ao longo do ano, com variações entre 0,606 e 0,665, está associada ao ciclo vegetativo das culturas. A análise de Silva

et al. (2019) na Bacia do Rio Pajeú no estado de Pernambuco mostrou que lavouras temporárias apresentam menor variabilidade espectral, com NDVI moderado e constante, refletindo o manejo agrícola e a previsibilidade do crescimento das culturas.

Figura 6 - Índices de NDVI em 2023 das classes de uso ao redor da Represa Jacareí-Jaguari



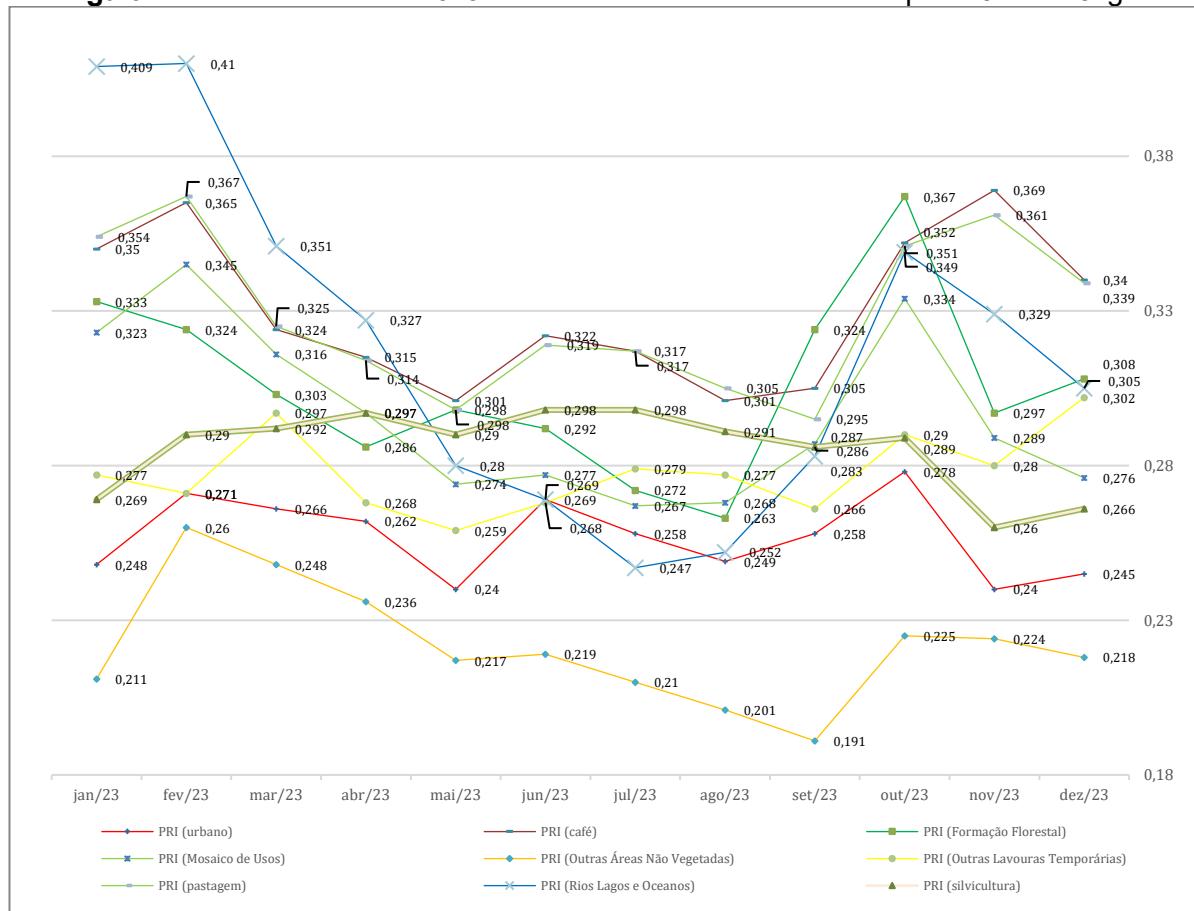
Organização: Autores (2024).

Por fim, os valores negativos de NDVI na classe água, como em janeiro (-0,218) e março (-0,325), são esperados devido à baixa reflectância no infravermelho próximo em superfícies líquidas. O pico positivo em agosto (0,524) pode ser atribuído ao crescimento de vegetação emergente nas margens, como discutido por Silva & Souza (2024), que identificaram aumento do NDVI em áreas úmidas durante o período de maior disponibilidade hídrica, especialmente em regiões com influência hidrogeológica.

O PRI (Figura 7) tem mostrado boa correlação com outros índices de vegetação, como o NDVI, na detecção de absorção de carbono. No entanto, para uma

análise mais abrangente, é necessário expandir os estudos para diferentes tipos de fitofisionomias. Modelos de eficiência radioativa, por exemplo, têm sido amplamente aplicados em florestas temperadas (AINSWORTH, 2013; GUARINI et al., 2014; ROSSINI et al., 2010; VICCA, 2016).

Figura 7 - Índices de PRI em 2023 das classes de uso ao redor da Represa Jacareí-Jaguarí



Organização: Autores (2024).

O estudo de Campoe (2008) demonstrou que práticas silviculturais intensivas, como controle de plantas competidoras e fertilização, aumentam significativamente a eficiência do uso da luz (LUE, sigla em inglês de Light Use Efficiency) em plantios de restauração da Mata Atlântica. Essa eficiência foi medida por meio da razão entre a produção primária líquida de madeira e a radiação fotossinteticamente ativa absorvida, o que está diretamente ligado ao desempenho fotossintético das árvores. A constância do PRI ao longo do ano, como observada em seus dados, pode ser explicada pela manutenção de condições fisiológicas favoráveis promovidas por esse tipo de manejo, que visa maximizar a produtividade o ano todo.

Ademais, Zhang et al. (2016) reforçam que o PRI é um indicador robusto da eficiência fotossintética em diferentes escalas espaciais e temporais. No entanto, para que o índice reflita com precisão a produtividade primária bruta (GPP, sigla em inglês de Gross Primary Production), é necessário ajustar sua aplicação para minimizar interferências de fatores físicos e estruturais, como o ângulo solar, a arquitetura do dossel e a composição pigmentar. O estudo destaca que, quando essas variáveis são controladas, o PRI apresenta forte correlação com a eficiência do uso da radiação solar e com o sequestro de carbono.

Por fim, Souza et al. (2022) aplicaram o PRI para avaliar a atividade fotossintética em diferentes tipos de cobertura vegetal, incluindo reflorestamentos, e constataram que áreas florestais apresentaram os melhores valores médios de refletância fotoquímica, indicando maior eficiência no uso da luz. Esses resultados corroboram a interpretação de que vegetações manejadas para fins produtivos mantêm alta eficiência fotossintética ao longo do ano.

Kothari et al. (2020) reforçam que o PRI é sensível às variações na composição de pigmentos fotoprotetores, como a xantofila, que regulam o estresse causado pelo excesso de luz. Em ambientes de silvicultura, onde o manejo busca minimizar o estresse ambiental e maximizar o crescimento, essa estabilidade do PRI ao longo do ano reflete uma condição fisiológica favorável e constante, com alta eficiência na conversão de luz em energia química.

Além disso, o estudo de Silva & Baptista (2015), realizado na Área de Proteção Ambiental (APA) Raimundo Irineu Serra no bioma Amazônico, mostrou que o PRI, quando combinado com NDVI e CO₂flux, demonstrou-se uma ferramenta eficaz para caracterizar a cobertura vegetativa e estimar o estoque de carbono em áreas de proteção e uso sustentável. A correlação entre os índices espectrais e o uso da terra reforça que vegetações densas e bem manejadas apresentam maior eficiência fotossintética e maior capacidade de sequestro de carbono, como observado nas áreas de silvicultura. A estabilidade do NDVI nas formações florestais, com valores elevados mesmo durante os meses secos, está alinhada com os estudos de Garcia (2020), que demonstrou que áreas de vegetação densa mantêm sua estrutura foliar e capacidade fotossintética mesmo sob estresse hídrico, evidenciando a resiliência ecológica dessas formações. Já o comportamento mais variável do CO₂flux na classe café, com picos no início do ano e quedas nos meses seguintes, pode ser explicado

pelo ciclo fenológico da cultura, como discutido por Souza et al. (2022), que relaciona a dinâmica do sequestro de carbono à sazonalidade e ao tipo de uso do solo, destacando que áreas agrícolas apresentam maior sensibilidade às variações climáticas.

Nas lavouras temporárias, a estabilidade dos índices NDVI e PRI ao longo do ano sugere um ciclo vegetativo previsível, com fases de crescimento bem definidas. A classe água, por sua vez, apresentou NDVI negativo na maior parte do ano, como esperado, mas com um pico positivo em agosto, possivelmente associado ao crescimento de vegetação emergente nas margens. Esse padrão é corroborado por Silva & Baptista (2015), que demonstraram que a vegetação aquática pode influenciar significativamente os índices espectrais e o CO_2 flux em ambientes úmidos, especialmente durante períodos de maior disponibilidade hídrica.

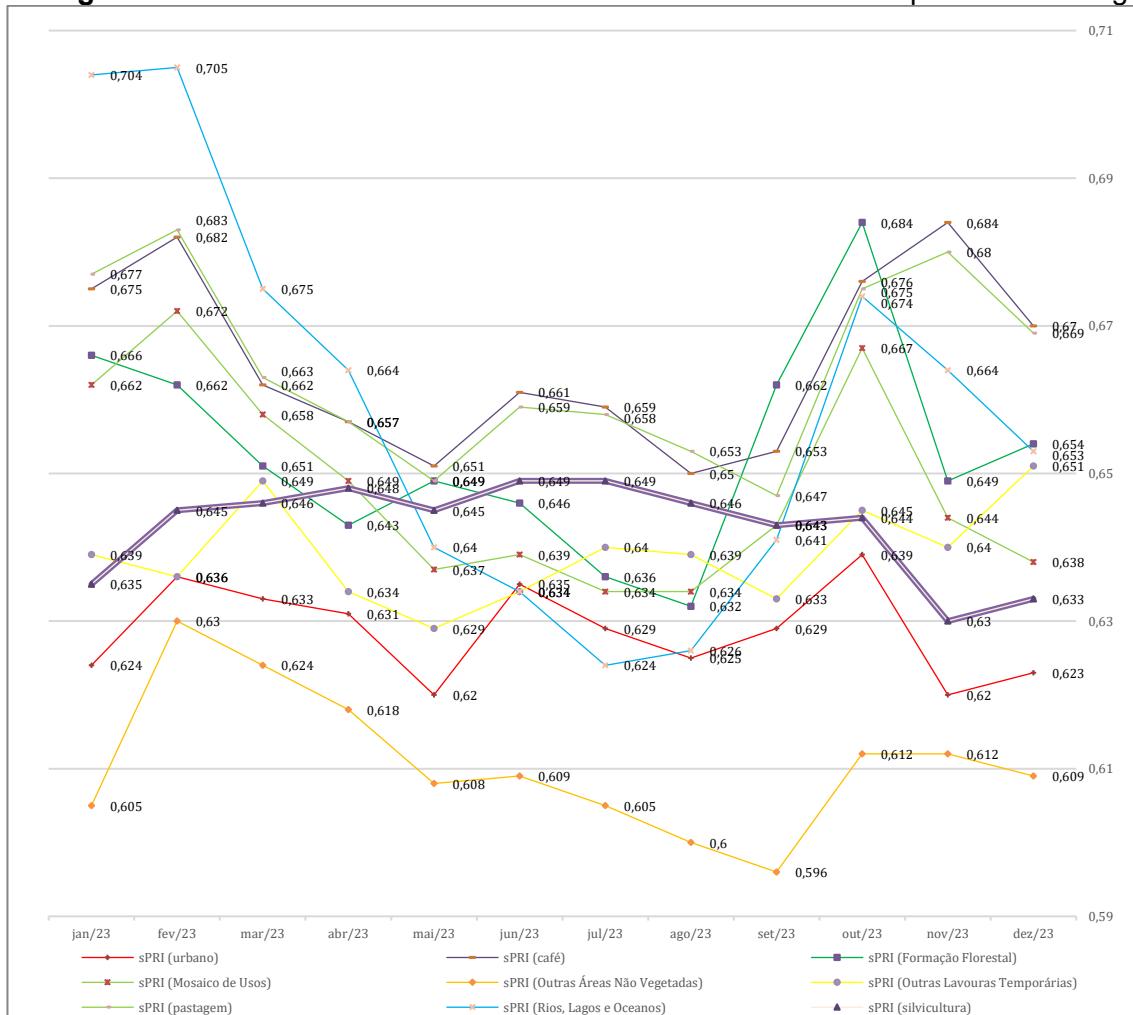
O estudo de Kasimati et al. (2023) investigou a correlação entre diferentes índices de vegetação, incluindo NDVI e PRI, em vinhedos, utilizando sensores proximais e remotos. Os autores demonstraram que a combinação desses índices permite uma caracterização mais precisa da variabilidade espacial e temporal da vegetação, especialmente em relação à produtividade e à qualidade da biomassa. A correlação entre NDVI e atributos fisiológicos, como a eficiência fotossintética, reforça o uso conjunto com o PRI para monitoramento da saúde vegetal.

Complementarmente, Wani et al. (2021) avaliaram a relação entre NDVI e fatores biofísicos em florestas temperadas no Himalaia, incluindo densidade de copa, biomassa e altitude. Embora o foco principal tenha sido o NDVI, o estudo destaca que a variabilidade espectral associada à estrutura da vegetação pode ser ampliada com o uso de índices como o PRI, especialmente para entender a dinâmica do carbono e a resposta da vegetação às mudanças climáticas.

Além disso, a revisão de Huang et al. (2020) sobre o uso do NDVI em sensoriamento remoto destaca que, embora o NDVI seja amplamente utilizado para estimar biomassa e vigor vegetativo, sua combinação com outros índices espectrais como o PRI é recomendada para superar limitações como saturação espectral e efeitos atmosféricos. Essa abordagem integrada melhora a estimativa da produtividade primária e da eficiência no uso da luz, especialmente em vegetações densas ou em transição fenológica.

A análise dos índices NDVI e PRI, conforme demonstrado por Testa et al. (2022), reforça que áreas urbanas e não vegetadas apresentam baixa absorção de radiação solar e menor eficiência fotossintética, devido à predominância de superfícies expostas que refletem grande parte da radiação incidente. Esse padrão é observado nas zonas urbanizadas no entorno da represa Jacareí-Jaguari, onde ocupações irregulares têm reduzido a cobertura vegetal, contribuindo para a diminuição dos valores desses índices espectrais

Figura 8 - Índices de sPRI em 2023 das classes de uso ao redor da Represa Jacareí-Jaguari



Organização: Autores (2024).

O sPRI também demonstrou boas correlações com a eficiência do uso da energia solar para a fotossíntese, mas requer escalonamento para evitar valores negativos (AINSWORTH, 2013; GUARINI et al., 2014; ROSSINI et al., 2010; VICCA, 2016; ZHANG et al., 2016). Guarini et al (2014) observaram relações positivas entre

o NDVI e o sPRI com a eficiência no uso da luz, concluindo que a vegetação pode utilizar a luz incidente como fonte de energia para a fotossíntese. No entanto, o NDVI mostrou correlações fracas quando usado para avaliar a eficiência da vegetação na respiração fotossintética.

CONCLUSÕES

Este estudo demonstrou a eficácia de integrar dados de alta resolução do satélite Planet com a Coleção 09 do MapBiomass para o monitoramento detalhado de mudanças no uso do solo e do fluxo de carbono na área da represa Jacareí-Jaguari. A análise temporal realizada ao longo de 2023 permitiu verificar a compatibilidade dos dados de ambas as fontes, identificando a estabilidade das áreas de vegetação nativa e a variação sazonal de áreas agrícolas e pastagens. Tais informações são essenciais para a gestão dos recursos hídricos e para garantir o abastecimento da RMSP, que depende diretamente da saúde ambiental da represa Jacareí-Jaguari.

As classes de uso e ocupação do solo que mais contribuíram para o sequestro de carbono foram as formações florestais e as áreas de café. As formações florestais demonstraram uma alta capacidade de sequestro de carbono ao longo do ano, especialmente após o período seco, destacando a resiliência dessas áreas. A cultura do café também teve um papel significativo, com uma boa capacidade de sequestro de carbono nos meses iniciais, seguida por uma redução ao longo do ciclo fenológico. As lavouras temporárias e o mosaico de usos mostraram contribuições moderadas e sazonais. Por outro lado, as áreas de água apresentaram oscilações, refletindo a dinâmica entre emissão e absorção de carbono típica de superfícies aquáticas. Esses resultados reforçam a importância de preservar as florestas e áreas agrícolas, tornando-as essenciais para políticas de conservação ambiental e mitigação das mudanças climáticas.

Com base na rotina computacional criada, foi possível identificar as áreas com maior e menor contribuição para o sequestro de carbono na vegetação ripária da represa Jacareí-Jaguari. Além disso, pudemos demonstrar a importância das parcelas de vegetação na manutenção do equilíbrio ambiental local. Sendo assim, esta pesquisa contribui para o desenvolvimento de políticas públicas para proteger o meio

ambiente e conscientizar a população sobre a importância de proteger espaços verdes e reservas naturais.

A predominância da classe "água" na área de estudo tem um impacto significativo nos índices de vegetação. A água absorve fortemente a luz nas bandas do infravermelho próximo e médio, resultando em valores baixos desses índices vegetativos, indicando pouca ou nenhuma atividade fotossintética. Consequentemente, o fluxo de CO₂ também é baixo, refletindo a menor absorção de carbono pela vegetação aquática ou pela ausência de vegetação.

A presente pesquisa pode levar a estudos futuros que aprimorem a metodologia utilizada e explorem o uso de novas tecnologias, assim como a integração de diferentes fontes de dados para obter resultados mais precisos. Estudos comparativos poderão ser realizados entre diferentes regiões, para identificar diferenças e semelhanças nos processos de sequestro de carbono e na importância das áreas de conservação. Assim, recomenda-se a realização de pesquisas que avaliem os impactos das mudanças climáticas nas áreas e unidades de conservação que identifiquem estratégias de adaptação dessas áreas às mudanças climáticas. Isso possibilitará a implementação de medidas de sensibilização e educação ambiental junto à população, que visem à conservação dos espaços verdes.

REFERÊNCIAS

- AGUIRRE-GUTIÉRREZ, J., Rifai, S.W., Deng, X. et al. Canopy functional trait variation across Earth's tropical forests. *Nature* 641, 129–136 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41586-025-08663-2>
- AINSWORTH, E. A. et al. Using leaf optical properties to detect ozone effects on foliar biochemistry. *Photosynth Res.* Illinois, p. 01-12, 23 abr. 2013.
- AZEVEDO, T. R. et al. 2018 SEEG initiative estimates of Brazilian greenhouse gas emissions from 1970 to 2015. *Nature: SCI. Data* 29 (5), 180045.
- BENAVIDES, Juan Carlos et al. Impactos das mudanças climáticas na agricultura. *Journal of Climate Change*, v. 12, n. 4, p. 123-145, 2024.
- BLANK, D. M. P. O Contexto das Mudanças Climáticas e as Suas Vítimas. *Mercator* (Fortaleza), v. 14, n. 2, p. 1-10, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/mercator/a/SgzwvyFQvzynyM8ZhdtRzjr/>. Acesso em: 15 abr. 2025.
- CAETANO, Robert et al. Uso de índices espectrais na caracterização da cobertura vegetal em região de Caatinga do Semiárido Baiano. *Revista de Geociências do*

Nordeste, [S.L.], v. 8, n. 2, p. 28-43, 18 ago. 2022. Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN. <http://dx.doi.org/10.21680/2447-3359.2022v8n2id26864>. Disponível em: <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2022v8n2ID26864>. Acesso em: 12 set. 2025.

CAMPOE, Otávio Camargo. Efeito de práticas silviculturais sobre a produtividade primária líquida de madeira, o índice de área foliar e a eficiência do uso da luz em plantios de restauração da Mata Atlântica. 2008. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Recursos Florestais, Silvicultura e Manejo Florestal, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2008. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-25072008-122441/publico/otavio.pdf>. Acesso em: 12 set. 2025.

CARLUCCI, C. E. et al. Análise do ciclo de vida e balanço de carbono em sistemas de produção cafeeira do cerrado mineiro, Brasil. Recima21 - Revista Científica Multidisciplinar - ISSN 2675-6218, [S.L.], v. 4, n. 12, p. 1-19, 22 dez. 2023. Editora RECIMA21 LTDA. <http://dx.doi.org/10.47820/recima21.v4i12.4690>. Disponível em: <https://recima21.com.br/index.php/recima21/article/view/4690>. Acesso em: 12 set. 2025.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO (SABESP) (São Paulo). Governo do Estado de São Paulo (org.). Água: De onde vêm? 2022. Disponível em: <http://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaold=31>.

CÔRTES, Pedro Luiz. Antecedentes que levaram à crise hídrica do Sistema Cantareira na Região Metropolitana de São Paulo. In: JACOBI, Pedro Roberto; FRACALANZA, Ana Paula; EMPINOTTI, Vanessa. Governança da água no contexto da escassez hídrica. São Paulo: IEE/USP, 2017. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/003042663>. Acesso em: 14 set. 2025.

COSTA, A. M. Mudanças climáticas e segurança alimentar. Revista Brasileira de Geografia, v. 10, n. 3, p. 67-89, 2018.

EMBRAPA. Estudo avalia impacto do aquecimento global na agricultura. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/18032326/estudo-avalia-impacto-do-aquecimento-global-na-agricultura>. 08 ago. 2008. Acesso em: 16 abr. 2025.

GARCIA, E. A. B. Estimativa do fluxo de CO₂ na camada limite da atmosfera sobre a rds uatumã/am-brasil por meio de imagens orbitais e dados micrometeorológicos. 2020. 146 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geografia, na Linha de Pesquisa: Estudos Ambientais e Geotecnologias, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/30549/4/EstimativaFluxoCO2.pdf>. Acesso em: 16 maio 2025.

GAMARRA, R. M. et al. Uso do NDVI na análise da estrutura da vegetação e efetividade da proteção de unidade de conservação no cerrado. Raega - O Espaço Geográfico em Análise, [S.L.], v. 37, n. -, p. 307-332, 22 ago. 2016. Universidade Federal do Paraná. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/raega/article/view/42454>. Acesso em: 12 set. 2025.

GORELICK, N. et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*. Toronto, v. 202, p. 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>.

GUARINI, R. et al. The utility of MODIS-sPRI for investigating the photosynthetic light-use efficiency in a Mediterranean deciduous forest. *International Journal of Remote Sensing*. Matera (Italia), p. 1-16. ago. 2014.

HEPP, L.; PASTORE, B. A importância da vegetação ripária para o funcionamento de riachos: efeitos da qualidade química e origem das espécies. *Vivências*, v. 17, n. 32, p. 185-194, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.31512/vivencias.v17i32.384>. Acesso em: 16 abr. 2025.

HUANG, S; TANG, L; HUPY, J. P.; WANG, Y; SHAO, G. A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal Of Forestry Research*, [S.L.], v. 32, n. 1, p. 1-6, 31 maio 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>

IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 184 pp., doi: 10.59327/IPCC/AR6-97892916916. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf. Acesso em: 16 abr. 2025.

JIN, Z.; TIAN, X.; WANG, Y.; ZHANG, H.; ZHAO, M.; WANG, T.; DING, J.; PIAO, S. A global surface CO₂ flux dataset (2015–2022) inferred from OCO-2 retrievals using the GONGGA inversion system. *Earth System Science Data*, v. 16, p. 2857-2876, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/essd-16-2857-2024>. Acesso em: 16 abr. 2025.

KASIMATI, A.; PSIROUKIS, V.; DARRA, N.; KALOGRIAS, A.; KALIVAS, D.; TAYLOR, J. A.; FOUNTAS, S.. Investigation of the similarities between NDVI maps from different proximal and remote sensing platforms in explaining vineyard variability. *Precision Agriculture*, [S.L.], v. 24, n. 4, p. 1220-1240, 8 fev. 2023. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11119-022-09984-2>.

KOTHARI, S.; MONTGOMERY, R. A.; CAVENDER-BARES, J. Physiological responses to light explain competition and facilitation in a tree diversity experiment. *Journal Of Ecology*. Inglaterra, p. 2000-2018. 18 nov. 2021. Disponível em: <https://shankothari.github.io/Documents/KotharietalJEcol2021.pdf>.

MAGALHÃES, D da Silva et al. Análise espaço-temporal do CO2FLUX e NDVI da região de integração do Caeté - nordeste da amazônia legal brasileira. In: XX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 20., 2023, Caeté. Anais [...] . São José dos Campos: Inpe, 2023. p. 1884-1887. Disponível em: https://proceedings.science/proceedings/100327/_papers/164549/download/abstract_file1?lang=pt-br&cf_chl_tk=QOIZ9RjRYWKB6KAoF2eNudBaJJ3W27L4aZbZgxr9br4-1757707108-1.0.1.1-cWIJX6jJOVj7I_e9R6P9ZtvFfRWXVp1IWwpXMXUQ6Wk. Acesso em: 12 set. 2025

MAPBIOMAS. Análise de dados de uso e cobertura da terra. 2024. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/wp-content/uploads/sites/4/2024/08/ATBD-Collection-9-v2.docx.pdf>

MARROTTA, Humberto et al. Relação positiva entre pluviosidade, carbono orgânico dissolvido e a supersaturação de CO₂ em uma lagoa costeira tropical. *Oecol Bras*, Rio de Janeiro, v. 12, n. 1, p. 92-99, jan. 2008. Mensal. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2880874>. Acesso em: 12 set. 2025. NEVES, L. Z. Uso do índice de vegetação na avaliação da dinâmica da vegetação e sua correlação com processos erosivos. Zenodo, [S.L.], v. 1, n. 13, p. 1-19, 17 dez. 2024. Disponível em: <https://revistas.ufvjm.edu.br/revista-espinhaco/article/view/414>. Acesso em: 12 set. 2025

NICFI. Planet, 2021. Programa Internacional de Imagens da Iniciativa de Florestas e Clima da Noruega. Disponível em: <https://www.planet.com/nicfi/>.

NOVO, E. M. L. M. et al. Técnicas avançadas de sensoriamento remoto aplicadas ao estudo de mudanças climáticas e ao funcionamento dos ecossistemas amazônicos. *Acta Amazônica*, 35(2), 185-194. 2005. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/aa/a/nHT843HzHKybNQQNJjcFLs/>

PEREIRA, L. de Castro et al. Fluxo de CO₂ e os índices de vegetação do Parque Nacional das Nascentes do Rio Parnaíba, Piauí, Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, Teresina, v. 13, n. 07, p. 3585-3601, 13 jul. 2020. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/245768/38026>.

POLINO, R. et al. Modelagem climática e previsões de longo prazo. *Climate Dynamics*, v. 20, n. 5, p. 345-367, 2015.

QUINTÃO, J. M. B. et al. Mudanças do uso e cobertura da terra no Brasil, emissões de GEE e políticas em curso. *Ciência e Cultura*, v. 73, n. 1, p. 18-24, 2021. Disponível em: http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0009-67252021000100004&tlang=pt.

RAHMAN, A.F.; GAMON, J.A.; FUENTES, D.A.; ROBERTS, D.; PRENTISS, D.; QIU, H. Modeling CO₂ flux of boreal forests using narrow-band indices from AVIRIS imagery. AVIRIS Workshop, JPL/NASA, Pasadena, Califórnia, 2000. 13 p. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2001JD900157>.

ROSSINI, M. et al. High-resolution field spectroscopy measurements for estimating gross ecosystem production in a rice field. *Agricultural and Forest Meteorology*. Milão, p. 1283-1296, 19 maio 2010.

SOUZA, L.C; OLIVEIRA, R. L. L; SOUZA, L. C.; ALVES, A. C; OLIVEIRA NETO, C.F; JESUS, F. N; SOUZA, A. A.; MOREIRA, G.C.. Emissão de CO₂ associada aos atributos do solo em área agrícola: uma revisão de literatura. *Desenvolvimento Rural e Sustentabilidade: energia, produção e novos mercados*, [S.L.], p. 157-168, 2022. Editora Científica Digital. <http://dx.doi.org/10.37885/220207864>. Disponível em: <https://www.editoracientifica.com.br/books/chapter/220207864>. Acesso em: 16 maio 2025.

SILVA, S. C. P. da; BAPTISTA, G M. Análises espectrais da vegetação com dados hyperion e sua relação com a concentração e o Fluxo De CO₂ em diferentes ambientes na amazônia brasileira. Boletim de Ciências Geodésicas, [S.L.], v. 21, n. 2, p. 354-370, jun. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1982-21702015000200020>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bcg/a/JQMMssh789dXTV7GJQQvX6B/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 12 set. 2025.

SILVA, M. OLIVEIRA; SOUZA, J. O. P de. Aplicação do normalized difference vegetation index (NDVI) e de dados pluviométricos na análise de áreas úmidas na chapada do araripe, nordeste do brasil. In: xvii simpósio de recursos hídricos do nordeste 1, 17., 2024, João Pessoa. Congresso. [S.L.]: *, 2024. v. 1, p. 1-10. Disponível em: <https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/237/XVII-SRHNE0131-1-20240708-145836.pdf>. Acesso em: 12 set. 2025.

TESTA, J.e.A.; VANZELA, L.s.; ANDREANI JÚNIOR, R.; GAMBI, L.G.O.; VAZQUEZ, G.H.. Modelagem da temperatura da superfície urbana em função da cobertura vegetal e da população de municípios paulistas. Desenvolvimento Rural e Sustentabilidade: energia, produção e novos mercados, [S.L.], p. 117-141, 2022. Editora Científica Digital. <http://dx.doi.org/10.37885/220308009>. Disponível em: <https://www.editoracientifica.com.br/books/chapter/220308009>. Acesso em: 16 maio 2025.

VICCA, S. et al., Remotely-sensed detection of effects of extreme droughts on gross primary production. Scientific Reports. Catalonia, p. 1-13. 15 jun. 2016.

YOGI, F; STANGANINI, F. N; TONELLO, K. C; ISA, S. S.. Evaluation of the potential for carbon sink and association with land occupation. Journal Of Water And Climate Change, [S.L.], v. 14, n. 2, p. 401-420, 19 jan. 2023. IWA Publishing. Disponível em: <https://iwaponline.com/jwcc/article-pdf/doi/10.2166/wcc.2023.296/1170486/jwc2023296.pdf>.

YANG, X., THORNTON, P., RICCIUTO, D., WANG, Y., & HOFFMAN, F. 2023. Global assessment of terrestrial biogeochemistry in the Energy Exascale Earth System Model (E3SM) and the role of the phosphorus cycle in the historical carbon balance. Biogeosciences, 20(14), 2813-2836. <https://doi.org/10.5194/bg-20-2813-2023>

WANI, A. A., Bhat, A.F., Gato, A.A. et al. Assessing relationship of forest biophysical factors with NDVI for carbon management in key coniferous strata of temperate Himalayas. Mitig Adapt Strateg Glob Change 26, 1 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11027-021-09937-6>

ZHANG, C. et al. Affecting Factors and Recent Improvements of the Photochemical Reflectance Index (PRI) for Remotely Sensing Foliar, Canopy and Ecosystemic Radiation-Use Efficiencies. Remote Sensing, Barcelona, v. 677, n. 8, p. 1-33, 23 ago. 2016. Mensal.