

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

ANÁLISE DE SEQUESTRO DE CARBONO NA BACIA DO RIO COTIA COM USO DE SENSORIAMENTO REMOTO: UMA ABORDAGEM PARA ESGOTAMENTO SANITÁRIO

Bruno Pereira Toniolo¹; Darllan Collins da Cunha e Silva²

Abstract: The accelerated urbanization and industrialization in the region have led to a significant increase in sewage production, often discharged directly into water bodies without adequate treatment, compromising water quality and interfering with carbon sequestration processes, as the presence of pollutants can alter the capacity of aquatic ecosystems to capture and store carbon. This study aims to map carbon sequestration in the Cotia River Basin (BHRC), located in the State of São Paulo (SP), using geoprocessing techniques, as well as to establish an association between CO₂flux levels and the flow rates of untreated sewage, evaluating environmental aspects. The methodology involved the selection of orbital images, calculation of the radiometric indices NDVI, PRI, and sPRI, and determination of CO₂flux. The results indicate that there is no significant correlation between sewage flow rates and CO₂flux values, suggesting that other variables or approaches may be necessary to better understand the factors influencing carbon sequestration in the Cotia River Basin. The analysis of the radiometric indices revealed significant variations in vegetation density and photosynthetic efficiency, highlighting the importance of exploring other variables and implementing mitigation measures to reduce the negative impacts of untreated sewage discharges.

Keyword: Geotechnologies; Basic Sanitation; CO₂flux; CBERS.

Resumo: A urbanização e industrialização aceleradas na região têm levado a um aumento significativo na produção de esgoto, frequentemente lançado diretamente nos corpos d'água sem tratamento adequado, comprometendo a qualidade da água e interfere nos processos de sequestro de carbono, já que a presença de poluentes pode modificar a capacidade dos ecossistemas aquáticos de capturar e armazenar carbono. Este trabalho tem como objetivo determinar o mapeamento de sequestro de carbono na Bacia Hidrográfica do Rio Cotia (BHRC), situada no Estado de São Paulo (SP), por meio de técnicas de geoprocessamento, assim como elaborar uma associação dos níveis de CO₂flux com as vazões de esgoto in natura, avaliando os aspectos ambientais. A metodologia envolveu a seleção de imagens orbitais, cálculo dos índices radiométricos NDVI, PRI e sPRI, e determinação do CO₂flux. Os resultados indicam que não há uma correlação significativa entre a vazão de esgoto e os valores de CO₂flux, sugerindo que outras variáveis ou abordagens podem ser necessárias para entender melhor os fatores que influenciam o sequestro de carbono na bacia do Rio Cotia. A análise dos índices radiométricos revelou variações significativas na densidade da vegetação e na eficiência fotossintética, destacando a importância de explorar outras variáveis e implementar medidas de mitigação para reduzir os impactos negativos dos lançamentos de esgoto in natura.

Palavras-Chave: Geotecnologias; Saneamento Básico; CO₂flux; CBERS.

1) Doutorando em Ciências Ambientais pela Unesp Sorocaba e Engenheiro Civil na Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (São Paulo): Av. Santos Dumont, 555 - Luz, São Paulo - SP, 01101-000 , 11 9542-12126, btoniolo@sabesp.com.br

2) Professor Doutor na Universidade Estadual de São Paulo (Unesp): Av. Três de Março, 511 - Alto da Boa Vista, Sorocaba - SP, 18087-180, 15 99162-2625, darllan.collins@unesp.br

INTRODUÇÃO

A urbanização e industrialização aceleradas na região têm levado a um aumento significativo na produção de esgoto, frequentemente lançado diretamente nos corpos d'água sem tratamento adequado. Esse problema não apenas compromete a qualidade da água, mas também interfere nos processos de sequestro de carbono, já que a presença de poluentes pode modificar a capacidade dos ecossistemas aquáticos de capturar e armazenar carbono (Moura et al., 2023).

Segundo Teixeira & Luiz (2024), o lançamento de esgoto in natura nos corpos d'água impacta significativamente o sequestro de carbono. A matéria orgânica e os nutrientes introduzidos alteram a composição química da água, reduzindo os níveis de oxigênio dissolvido e aumentando a demanda bioquímica de oxigênio (DBO). Isso prejudica a saúde das plantas aquáticas e dos microrganismos responsáveis pela fotossíntese e decomposição da matéria orgânica, essenciais para o sequestro de carbono. Portanto, o tratamento adequado do esgoto é fundamental para preservar a capacidade dos ecossistemas aquáticos de capturar e armazenar carbono, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas (Mothé et al., 2024).

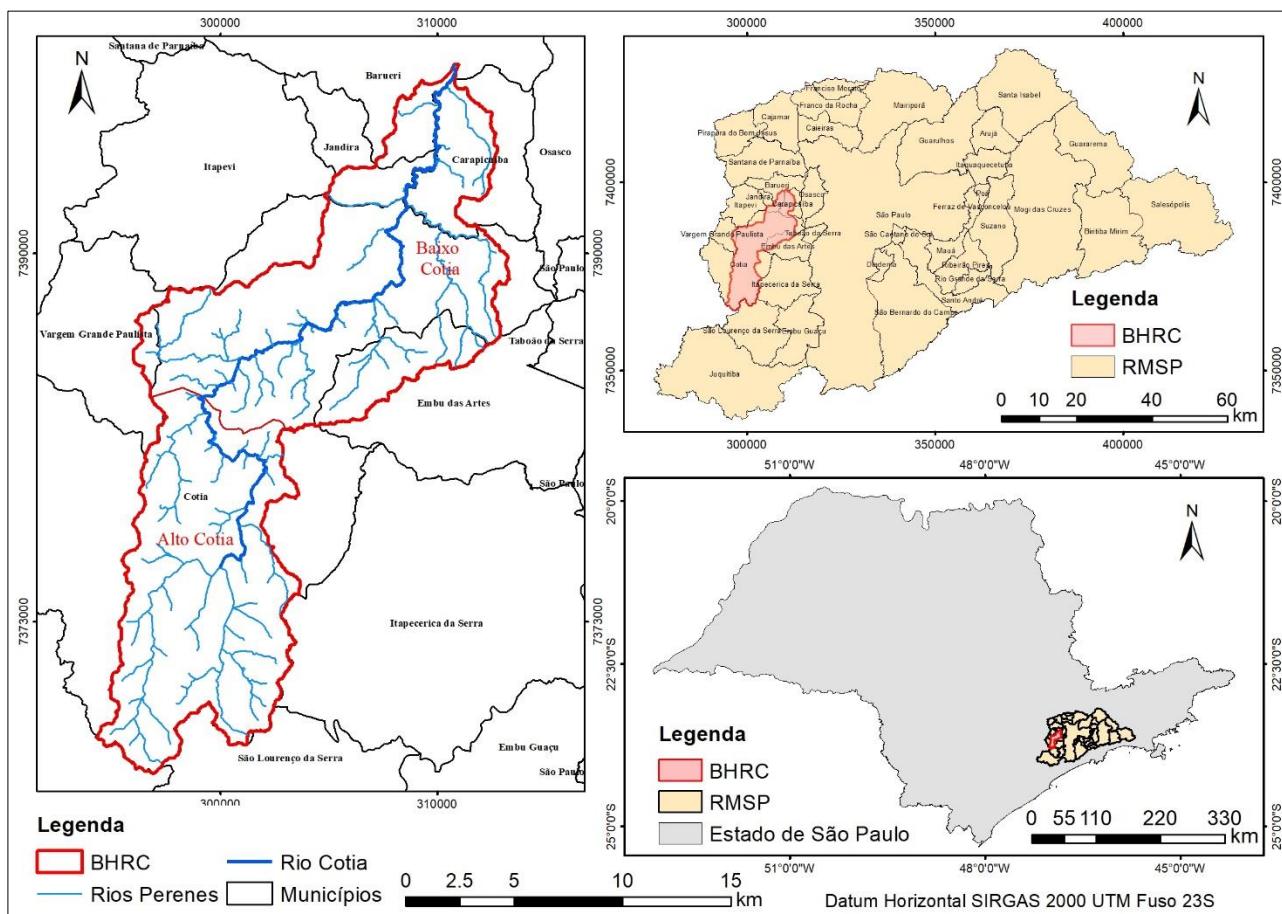
De acordo com Silva e Anjos (2021), os índices radiométricos ou espectrais são bons indicadores para mensurar a quantidade de estoque e sequestro de carbono, assim como biomassa e mudanças climáticas, como por exemplo o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e o PRI (*Photochemical Reflectance Index*). De forma que estes dois índices geram o CO₂flux, que é um índice que quantifica o sequestro de carbono, possibilitando o mapeamento da vegetação fotossinteticamente ativa em determinada região. Ressalta-se que o CO₂flux é proporcional ao fluxo de carbono e, dependente da integração entre o NDVI com o PRI, resultando nesse novo índice.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi determinar o mapeamento de sequestro de carbono na Bacia Hidrográfica do Rio Cotia (BHRC), situada no Estado de São Paulo (SP), por meio de técnicas de geoprocessamento, assim como elaborar uma associação dos níveis de CO₂flux com as vazões de esgoto in natura, avaliando os aspectos ambientais.

METODOLOGIA

A área de estudo é a Bacia Hidrográfica do Rio Cotia (BHRC), localizada na zona oeste da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), abrangendo os municípios de Barueri (2,80%), Carapicuíba (6,92%), Cotia (79,32%), Embu das Artes (7,01%), Jandira (2,81%) e Vargem Grande Paulista (1,15%). Com uma extensão de 251,36 km², a BHRC divide-se em duas regiões distintas, Baixo Cotia e Alto Cotia, cada uma com características próprias relacionadas às condições físicas e de preservação ambiental (Figura 2) (SABESP, 2024). A Figura 1 exibe o mapa de localização da BHRC.

Figura 1 – Mapa de localização da BHRC.



De acordo com Toniolo (2020), o Baixo Cotia é uma área intensamente antropizada, ou seja, com efetiva ação humana, residenciais ou industriais, no meio ambiente e seus impactos negativos como poluição da Água, ligações clandestinas, despejos de detritos em áreas inadequadas que, associados a ausência de infraestrutura de esgotamento e tratamento impactam a qualidade da água servida. (SÃO PAULO, 2007). O Alto Cotia corresponde à Reserva Florestal do Morro Grande (RFMG), um remanescente do Planalto Atlântico Paulista que abriga a nascente do Rio Cotia e as Represas Pedro Beicht e Cachoeira da Graça. Desde 1916, essa região compõe o Sistema Produtor do Alto Cotia, responsável pelo abastecimento de água para mais de 550 mil habitantes na RMSP (TONIOLI, 2020). No entanto, o Baixo Cotia não conta com a devida proteção ambiental, apresentando ocupação das várzeas, contaminação da água e assoreamento pelo uso irregular do solo.

O trabalho foi realizado sem seis etapas: seleção das imagens orbitais, determinação do NDVI, determinação do PRI, reescalonamento do PRI para gerar o sPRI, determinação do CO₂flux e análise dos índices gerados a partir dos lançamentos de esgoto in natura. O Sistema de Informação Geográfica (SIG) utilizado foi o ArcGIS Pro 3.1 (ESRI, 2025).

As imagens áreas foram obtidas do satélite CBERS 04A, no site do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), com as seguintes características: data de 24 de julho de 2024, cobertura de nuvem em 2%, resolução espacial de 8 m (2 m na pancromática), câmera multiespectral e pancromática de ampla varredura (WPM), ponto orbital 203/143 (BRASIL, 2025). As bandas espectrais utilizadas foram B1 (azul – 0,45 a 0,52 µm), B2 (verde – 0,52 a 0,59 µm), B3 (vermelho –

0,63 a 0,69 μm), B4 (infravermelho próximo – 0,77 a 0,89 μm) e B5 (pancromática – 0,45 a 0,90 μm). Foi aplicado o comando *Create PanSharpened Raster Dataset* no SIG para ampliar a resolução de 8 para 2 metros.

O cálculo de cada índice radiométrico está descrito na Tabela 1, sendo que o comando usado no SIG foi o *Raster Calculator*, tendo como produto uma imagem em formato *GeoTiff* de cada índice.

Tabela 1 – Postos pluviométricos utilizados

Índice	Equação	Descrição
NDVI	$(B4 - B3) / (B4 + B3)$	Onde B4 é banda do infravermelho próximo e B3 é banda do vermelho.
PRI	$(B1 - B2) / (B1 + B2)$	Onde B1 é banda do azul e B2 é banda do verde.
sPRI	$(PRI + 1) / 2$	Como o PRI é apresentado em valores negativos, seus valores precisam ser reescalados.
CO2flux	$NDVI \times sPRI$	Valor adimensional.

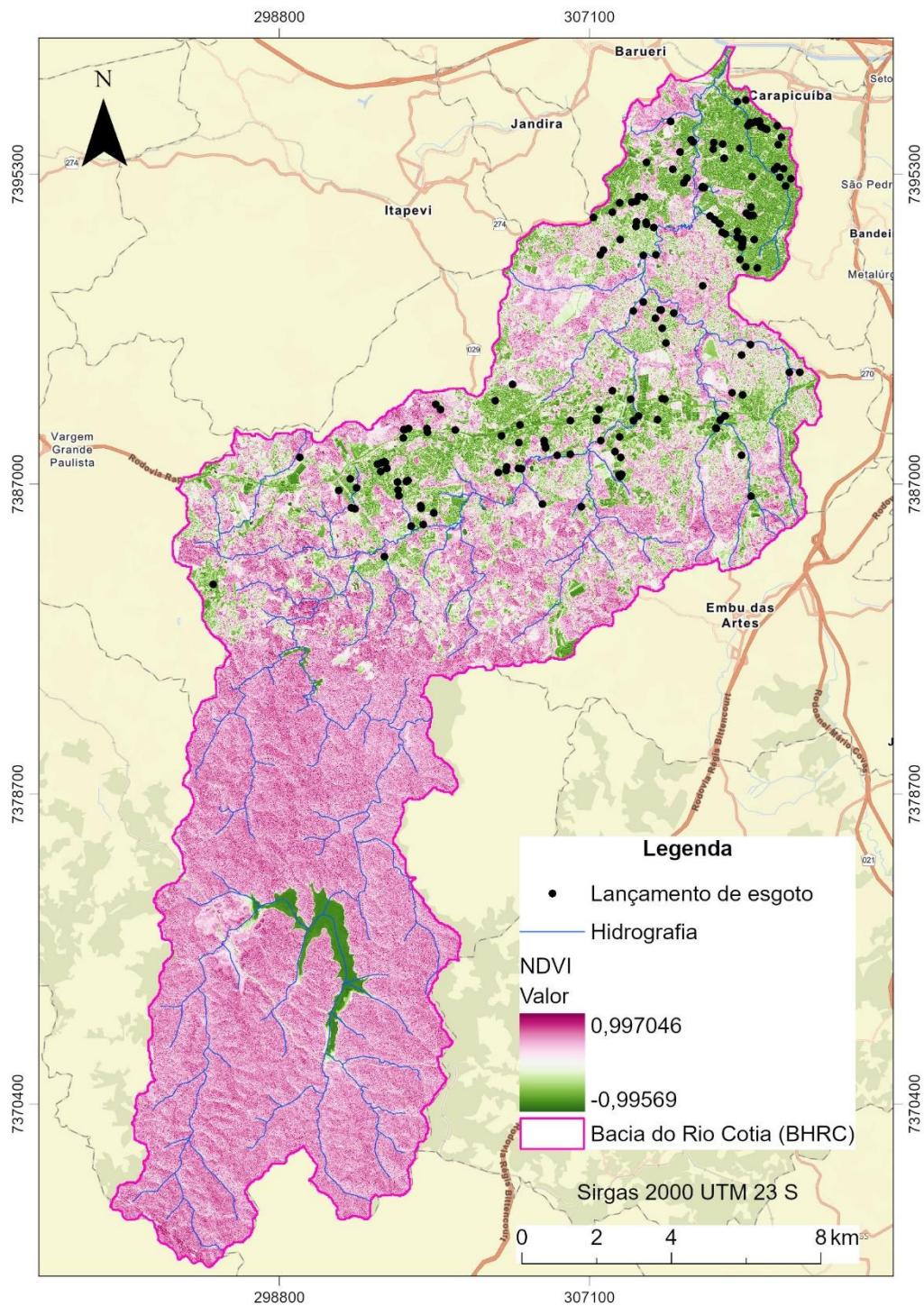
Foram geradas estatística descritiva e histograma de cada índice radiométrico para então determinar-se os valores de CO2flux de cada lançamento de esgoto in natura (SABESP, 2024), por meio do comando *Add Surface Information* no SIG. Por fim os valores de CO2flux foram correlacionados com os valores de vazão (l/s), por meio do comando Regressão – Análise de dados no Excel, incluindo análise de variância, isto é, teste de ANOVA (MICROSOFT, 2025).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A BHRC possui um total de 180 lançamentos de esgoto, sendo 105 situadas em áreas antropizadas e 75 em regiões naturais ou periurbanas. A vazão destes lançamentos de esgoto varia de 1 a 12 l/s, sendo a média igual a 1,17 l/s e abarcam um total de 45.906 economias que tem o esgoto somente coletado. Em relação à quantidade de imóveis, existem 25.977 unidades que totalizam uma vazão de 211,24 l/s do esgoto que é destinado ao solo, cursos de água ou galeria de águas pluviais.

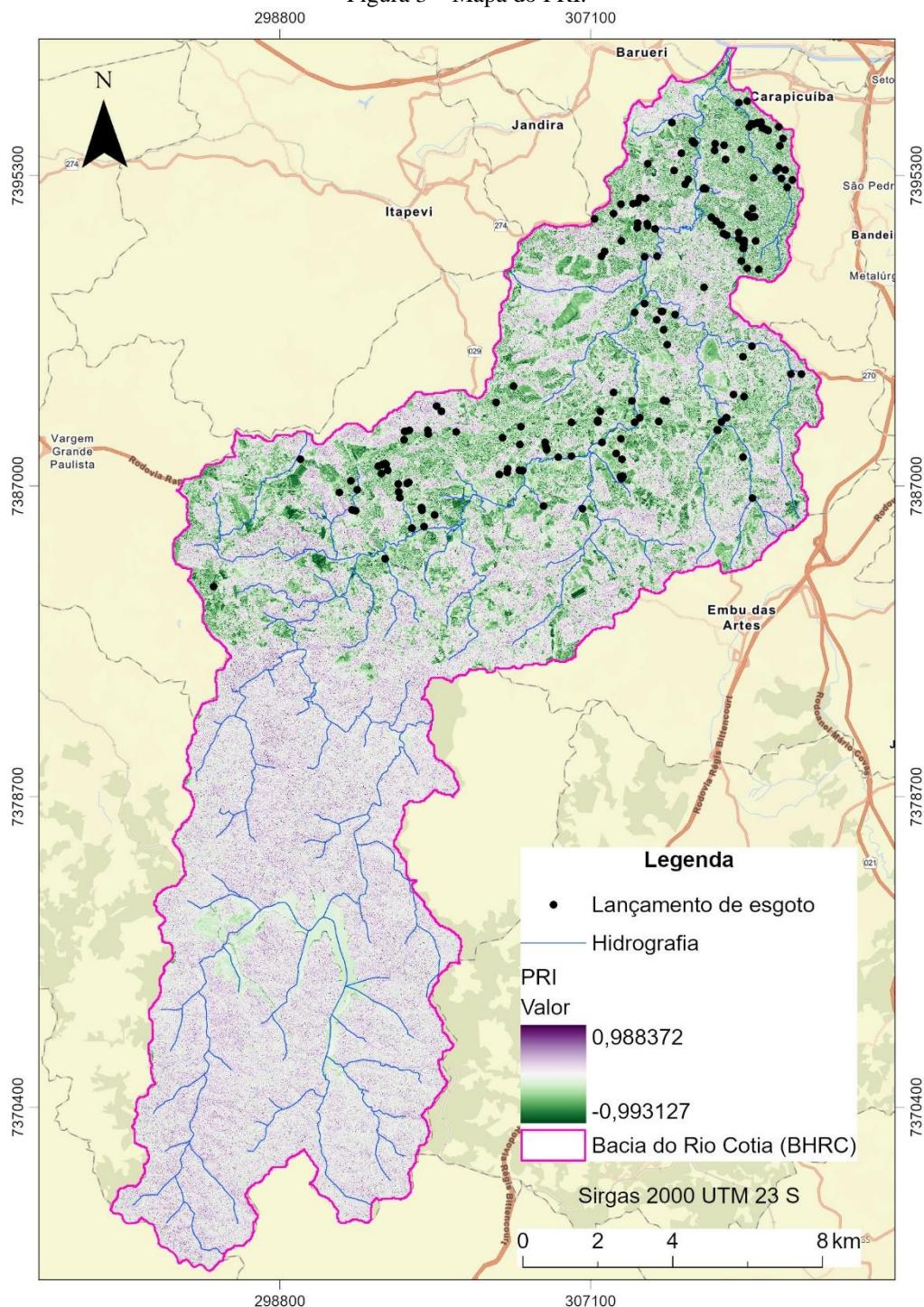
As Figuras 2, 3, 4 e 5 apresentam os mapas dos índices radiométricos NDVI, PRI, sPRI (*Structural Photochemical Reflectance Index*) e CO2flux, respectivamente.

Figura 2 – Mapa do NDVI.



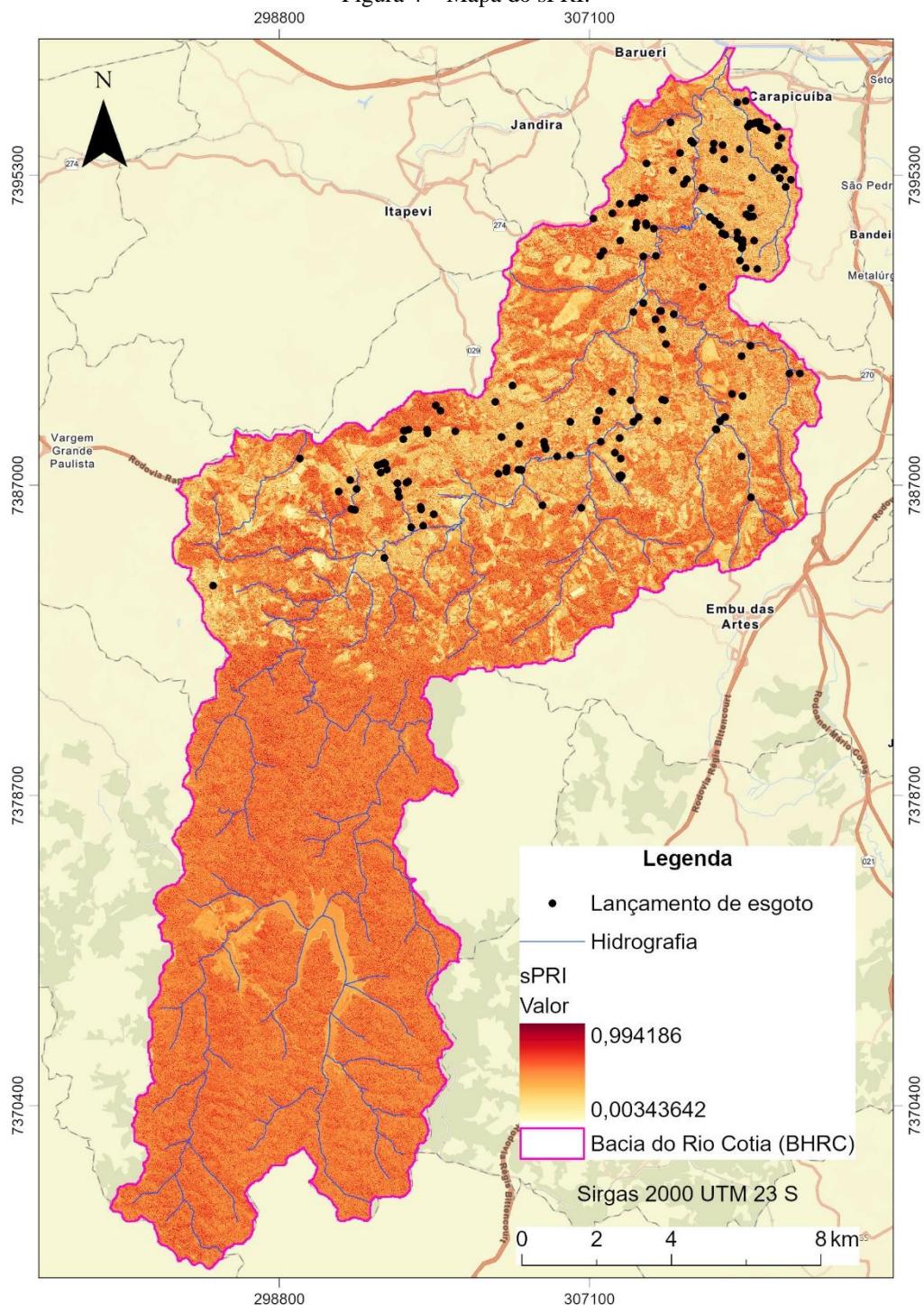
Analisando a Figura 2, que apresenta o mapa de NDVI da bacia do Rio Cotia, observa-se a distribuição da vegetação fotossinteticamente ativa. Áreas em verde indicam vegetação saudável, essencial para o sequestro de carbono. Os pontos pretos representam lançamentos de esgoto in natura, que podem impactar negativamente a vegetação próxima e reduzir a eficiência do sequestro de carbono. As linhas azuis mostram os corpos d'água, onde a vegetação ribeirinha é crucial para a qualidade da água e o sequestro de carbono. Monitorar o NDVI ao longo do tempo ajuda a identificar áreas críticas e implementar medidas de mitigação.

Figura 3 – Mapa do PRI.



Analizando a Figura 3, que apresenta o mapa de PRI da bacia do Rio Cotia, observa-se a distribuição espacial da eficiência do uso da luz pela vegetação. O PRI é sensível às mudanças na atividade fotossintética e complementa as informações fornecidas pelo NDVI. As áreas com valores mais altos de PRI, indicadas em rosa, representam vegetação com alta eficiência fotossintética, enquanto valores mais baixos, indicados em verde, sugerem menor eficiência, isto é, áreas urbanizadas. Os pontos pretos no mapa representam os locais de lançamento de esgoto in natura, e é importante observar a proximidade desses pontos com as áreas de alta eficiência fotossintética.

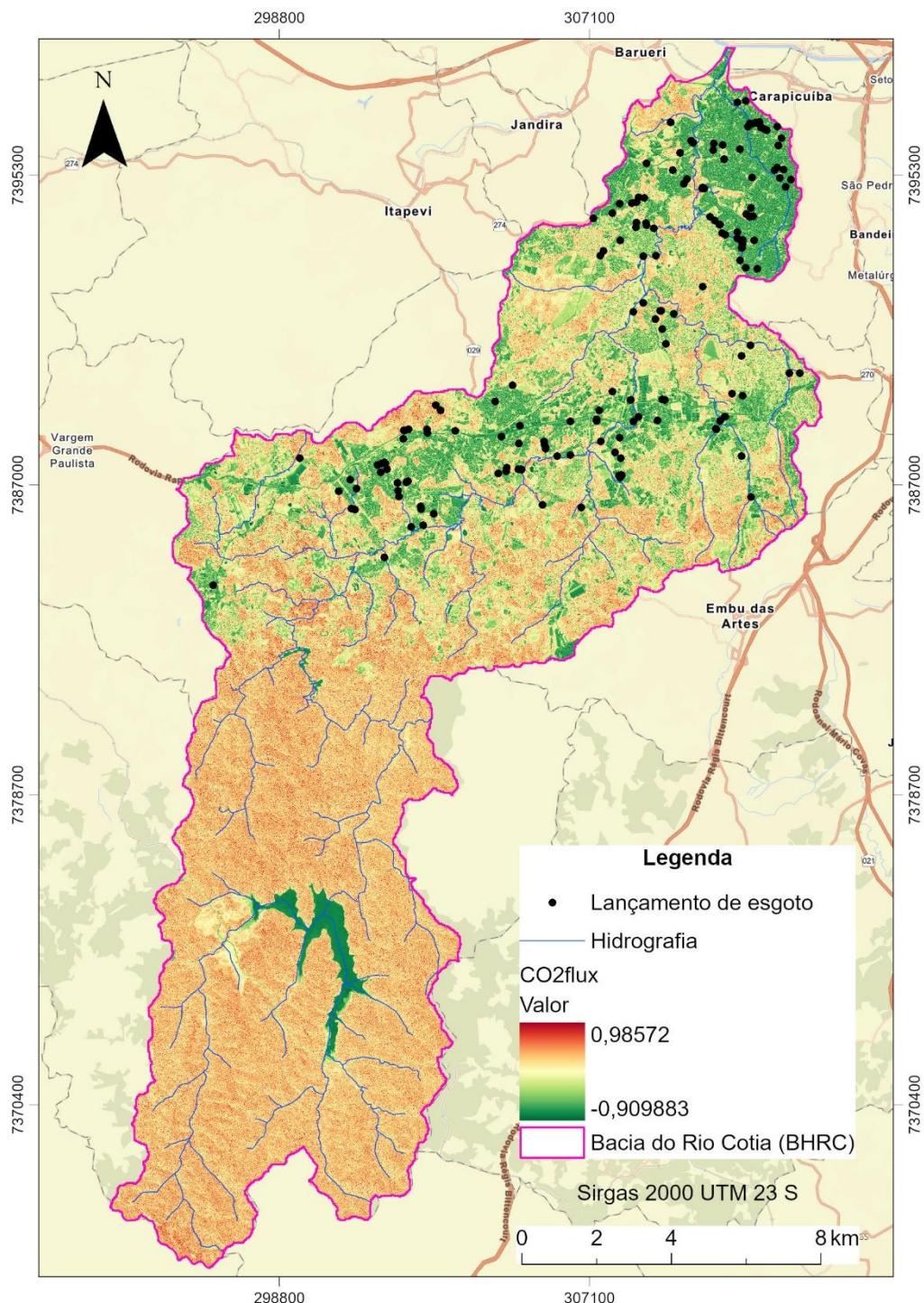
Figura 4 – Mapa do sPRI.



Analisando a Figura 4, que apresenta o mapa do sPRI da bacia do Rio Cotia, observa-se a distribuição espacial da estrutura da vegetação e sua eficiência fotossintética. O sPRI é uma variação do PRI (Photochemical Reflectance Index) que leva em conta a estrutura da vegetação, proporcionando uma visão mais detalhada da capacidade de sequestro de carbono das diferentes áreas vegetadas. Enquanto o PRI mede a eficiência do uso da luz pela vegetação, o sPRI considera também a robustez estrutural das plantas, oferecendo uma análise mais completa. As áreas com valores mais altos de sPRI, indicadas em vermelho escuro, representam vegetação com alta eficiência

fotossintética e estrutura robusta, enquanto valores mais baixos, indicados em laranja claro, sugerem menor eficiência e estrutura menos desenvolvida.

Figura 5 – Mapa do CO₂flux.



Analizando a Figura 5, verifica-se que o sequestro de carbono é o menor entre a hidrografia e os espelhos de água, seguido das áreas urbanas representado pela cor verde, de forma que as áreas com maior captação de carbono são as áreas naturais, isto é vegetação arbustiva e arbórea, representadas no mapa em tons de laranja e vermelho. Lançamentos de esgoto próximos a áreas com

altos valores de PRI podem impactar negativamente a eficiência da fotossíntese e, consequentemente, o sequestro de carbono. A presença de esgoto in natura pode alterar a composição química da água, afetando a vegetação ribeirinha e sua eficiência fotossintética.

A Tabela 2 apresenta a estatística descritiva dos quatro índices radiométricos.

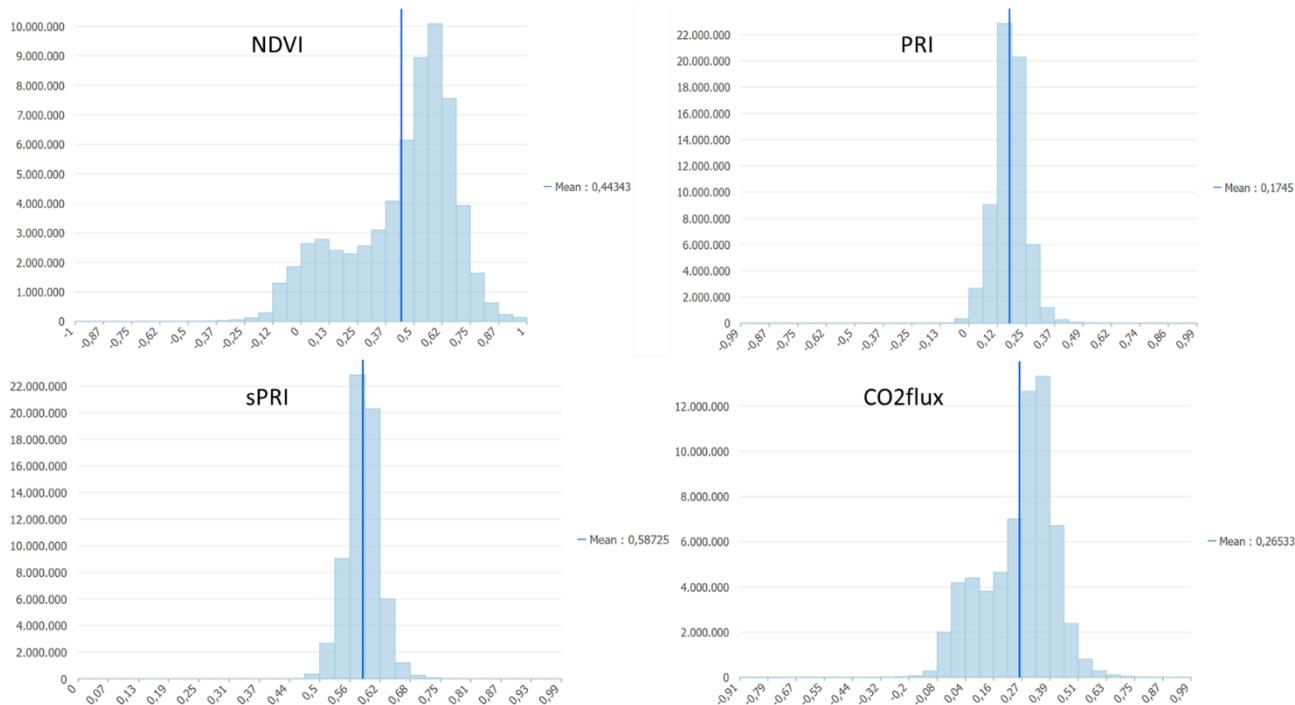
Tabela 2 – Estatística descritiva dos indicadores.

Índice	NDVI	PRI	sPRI	CO2flux
Mínimo	-0,9957	-0,9931	0,0034	-0,9099
Máximo	0,9970	0,9883	0,9941	0,9857
Média	0,4434	0,1745	0,5872	0,2653
Desvio Padrão	0,2361	0,0637	0,0336	0,1473

A Tabela 2 apresenta que o NDVI mostra uma ampla variação na densidade da vegetação na bacia do Rio Cotia, com áreas que vão desde vegetação muito escassa até vegetação muito densa. Já o PRI sugere que a eficiência fotossintética das plantas na área estudada é mais uniforme, com variações menores comparadas ao NDVI, enquanto o sPRI indica que a maioria das áreas tem uma eficiência fotossintética padronizada bastante elevada, com uma média relativamente alta e variações menores. Por fim, o CO2flux mostra uma variação significativa no sequestro de carbono na bacia do Rio Cotia, com algumas áreas absorvendo muito CO2 e outras absorvendo muito pouco.

A Figura 6 apresenta os histogramas dos índices radiométricos.

Figura 6 – Histograma dos indicadores.



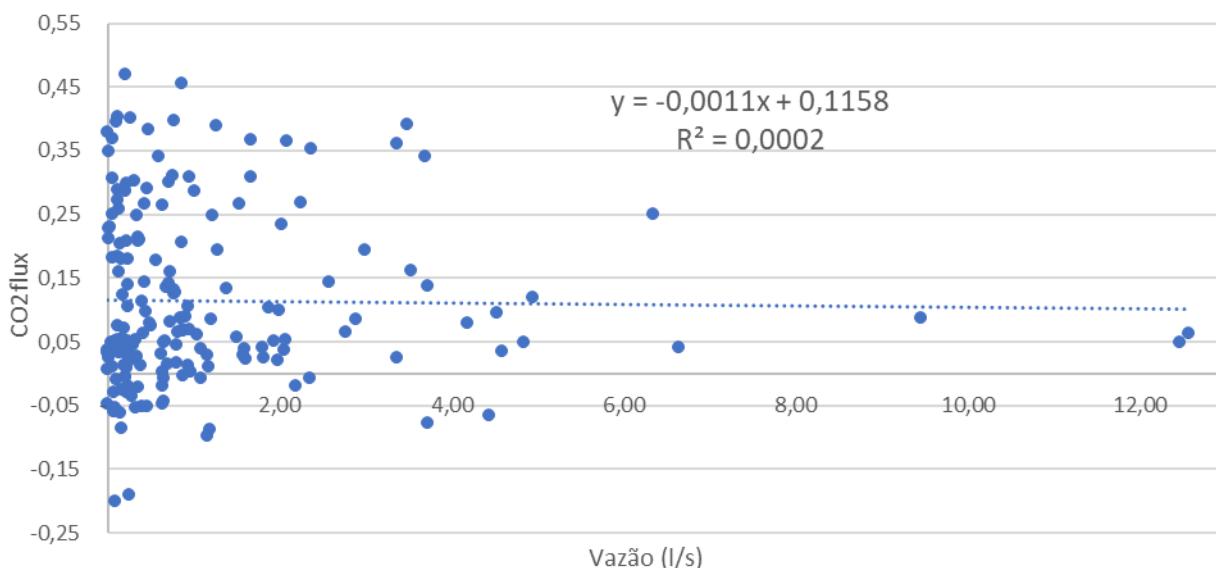
Analisando a Figura 6, observa-se que o histograma do NDVI revela uma ampla distribuição dos valores, indicando variações significativas na densidade da vegetação na bacia do Rio Cotia de forma que a média está próxima do centro da distribuição, sugerindo que há uma mistura de áreas com vegetação densa e escassa.

Já o histograma do PRI (Figura 6) mostra uma distribuição mais concentrada, com a maioria dos valores próximos à média. Isso sugere que a eficiência fotossintética das plantas na área estudada é relativamente uniforme. O histograma do sPRI apresenta uma distribuição semelhante ao PRI, com a maioria dos valores concentrados em torno da média. Isso indica que a eficiência fotossintética padronizada é alta na maioria das áreas.

Por fim a análise da Figura 6 exibe que o histograma do CO₂flux revela uma variação significativa nos valores de sequestro de carbono, com alguns valores muito altos e outros muito baixos. A média está deslocada para a direita, indicando que há áreas com alto sequestro de carbono.

A Figura 7 apresenta o gráfico de dispersão entre os valores de CO₂flux com os valores de vazão de esgoto in natura.

Figura 7 – Gráfico de dispersão CO₂flux vs. vazão.



Analisando a Figura 7, os resultados da regressão linear entre os valores de CO₂flux e a vazão de esgoto em l/s foram analisados para determinar a significância estatística da relação entre essas variáveis. A análise estatística revelou que o R múltiplo foi de 0,0153, indicando uma correlação extremamente fraca entre a vazão de esgoto e os valores de CO₂flux. O coeficiente de determinação (R^2) foi de 0,0002, sugerindo que apenas 0,02% da variação no CO₂flux pode ser explicada pela vazão de esgoto, o que indica que a vazão não é um bom preditor para o CO₂flux. O R^2 ajustado foi de -0,0053, um valor negativo que reforça a inadequação do modelo, indicando que a inclusão da variável de vazão não melhora a explicação da variação no CO₂flux. O erro padrão foi de 0,1372, representando a média dos erros de previsão do modelo, e um erro padrão alto sugere que as previsões do modelo são imprecisas. Foram utilizadas 180 observações na regressão.

A análise de variância (ANOVA) mostrou que o valor de p associado ao teste F foi de 0,8384, muito maior que 0,05, indicando que o modelo de regressão não é estatisticamente significativo. Isso significa que não há evidência suficiente para afirmar que a vazão em l/s tem um impacto significativo no CO₂flux. A interceptação teve um coeficiente de -0,0116, representando o valor do CO₂flux quando a vazão é zero, com um erro padrão de 0,0103, indicando a precisão da estimativa do coeficiente. O valor de p foi de 0,2600, maior que 0,05, indicando que a interceptação não é estatisticamente significativa. O intervalo de confiança de 95% para a interceptação foi de -0,0318 a 0,0086, incluindo zero, reforçando que a interceptação não é significativa.

A vazão em l/s teve um coeficiente de 2,687, indicando a mudança esperada no CO2flux para cada aumento de 1 l/s na vazão, com um erro padrão de 4,167, indicando a precisão da estimativa do coeficiente. O valor de p foi de 0,6448, maior que 0,05, indicando que a vazão não é estatisticamente significativa. O intervalo de confiança de 95% para a vazão foi de -5,547 a 10,921, incluindo zero, indicando que a vazão não tem um efeito significativo no CO2flux.

CONCLUSÃO

A análise dos índices radiométricos NDVI, PRI, sPRI e CO2flux revelou variações significativas na densidade da vegetação e na eficiência fotossintética na bacia do Rio Cotia. As áreas urbanas e hidrografia apresentaram baixo sequestro de carbono, enquanto as áreas naturais, como florestas e vegetação arbustiva, mostraram alto sequestro de carbono. Os lançamentos de esgoto in natura impactam negativamente a vegetação ribeirinha e a qualidade da água, reduzindo a eficiência do sequestro de carbono.

Os resultados indicam que não há uma correlação significativa entre a vazão de esgoto em l/s e os valores de CO2flux. O modelo de regressão não é estatisticamente significativo, e os coeficientes não são confiáveis para prever o CO2flux com base na vazão. Portanto, outras variáveis ou abordagens podem ser necessárias para entender melhor os fatores que influenciam o sequestro de carbono na bacia do Rio Cotia.

Apesar da correlação fraca entre a vazão de esgoto e o CO2flux, a metodologia utilizada demonstrou ser eficaz para mapear e analisar o sequestro de carbono na bacia do Rio Cotia. A utilização de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento permitiu uma avaliação detalhada dos impactos ambientais do esgotamento sanitário.

Para futuras pesquisas, recomenda-se explorar outras variáveis que possam influenciar o sequestro de carbono, como a qualidade da água, a composição química do esgoto e a saúde da vegetação. Além disso, é importante considerar a implementação de medidas de mitigação para reduzir os impactos negativos dos lançamentos de esgoto in natura, preservando a capacidade dos ecossistemas aquáticos de capturar e armazenar carbono.

REFERÊNCIAS

- BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. *CBERS 04 A – Câmeras Imageadoras*. 2025. Disponível em <<https://www.gov.br/inpe/pt-br/programas/cbers/sobre-o-cbers-1/cbers-04a/cameras-imageadoras>>. Acessado em 28 abr. 2025.
- ESRI. *ArcGIS Pro – the world's leading desktop GIS software*. 2025. Disponível em <<https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-pro/overview>>. Acessado em 28 abr. 2025.
- MICROSOFT. *Suporte Excel – PROJ.LIN (Função Proj.Lin)*. 2025. Disponível em <<https://support.microsoft.com/pt-br/office/proj-lin-fun%C3%A7%C3%A3o-proj-lin-84d7d0d9-6e50-4101-977a-fa7abf772b6d>>. Acessado em 07 abr. 2025.
- MOURA, T. C. C.; ESTEVES; A. M. S. L.; ESTEVES; L. V., OLIVEIRA; T. DE L., DE MELO, E. S. R. L.; & ALVES; E. M. Estimativa da emissão de carbono no tratamento de esgoto do município de Garanhuns-PE. *Brazilian Journal of Development*, 9(1), 1292–1307. <https://doi.org/10.34117/bjdv9n1-089>, 2023.

MOTHÉ, R. B.; ANDRADE, R. C.; SILVA, Y. M.; RAMOS, L. T. A.; GOMES, C. N.; CRUZ, M. E. L.; NOGUEIRA, V. G.; SILVA, G. F. S.; TORRES NETO, A. *Identificação das pressões antrópicas e seus impactos nas águas da Bacia do Rio Guandu*. Anais do XV Encontro Nacional de Águas Urbanas e V Simpósio de Revitalização de Rios Urbanos, Recife – PE, 10 p., 2024.

SABESP. Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. Servidor do Cadastro Oeste. *Mapas temáticos da Unidade Oeste – MO Sabesp*. São Paulo, 2024. Mapas diversos: 118,9 x 84,1 cm. Escala: 1:20.000.

SÃO PAULO (Estado). *Relatório nº 88 219-205 – Plano de Desenvolvimento e Proteção Ambiental da Bacia do Rio Cotia: Caracterização Regional*. Drenatec Engenharia S/C Ltda & Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT. São Paulo, 2007.

SILVA, M. A.; ANJOS, C. S. Análise do sequestro de carbono na região do Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros utilizando técnicas de sensoriamento remoto. *Rev. Bras. Geom.*, v. 9, n. 3, p. 251-270, 2021.

TEIXEIRA, D.; LUIZ, E. L. Uso e ocupação do solo urbano e a disposição dos esgotos sanitários na Bacia do Rio Itacorubi, Florianópolis/SC. *Revista Caminhos de Geografia*, v. 25, n. 100, p. 254-268, 2024.

TONILO, B. P. *Metodologia de avaliação de degradação ambiental utilizando técnicas de geoprocessamento e Sensoriamento Remoto na Bacia Hidrográfica do Rio Cotia – SP*. Dissertação de Mestrado, 123 f. Universidade Estadual Paulista (Unesp), Sorocaba, SP, 2020.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Sabesp por ter disponibilizado o material para realização deste trabalho.