

**INSTITUTO FEDERAL GOIANO – CAMPUS RIO VERDE
ENGENHARIA AMBIENTAL**

CARLOS FERNANDO DE OLIVEIRA VASCONCELOS

**MAPEAMENTO ESPAÇO TEMPORAL DO USO E OCUPAÇÃO DO
SOLO E SUA INFLUÊNCIA NO ESTADO TRÓFICO DOS CORPOS
HÍDRICOS**

**RIO VERDE - GO
2024**

CARLOS FERNANDO DE OLIVEIRA VASCONCELOS

**MAPEAMENTO ESPAÇO TEMPORAL DO USO E OCUPAÇÃO DO
SOLO E SUA INFLUÊNCIA NO ESTADO TRÓFICO DOS CORPOS
HÍDRICOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à banca Examinadora do curso de Engenharia Ambiental do Instituto Federal Goiano (IFG) como exigência parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Peres Angelini

RIO VERDE – GO
2024

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano

V331m Vasconcelos, Carlos Fernando de Oliveira
Mapeamento espaço temporal do uso e ocupação do solo e sua influência no estado trófico dos corpos hídricos / Carlos Fernando de Oliveira Vasconcelos ; orientador Lucas Peres Angelini. -- Rio Verde, 2024.
41 f.

TCC (Bacharelado em Engenharia Ambiental) -- Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, 2024.

1. Sensoriamento remoto. 2. Qualidade da água. 3. Uso e ocupação do Solo. 4. Índices espectrais. 5. Estado trófico. I. Angelini, Lucas Peres, orient. II. Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

Identificação da Produção Técnico-Científica (assinale com X)

- Tese
- Dissertação
- Monografia – Especialização
- Artigo - Especialização
- TCC - Graduação
- Artigo Científico
- Capítulo de Livro
- Livro
- Trabalho Apresentado em Evento
- Produção técnica. Qual: _____

Nome Completo do Autor: **Carlos Fernando de Oliveira Vasconcelos,**

Matrícula: 2020102200740110

Título do Trabalho: **Mapeamento Espaço Temporal do Uso e Ocupação do Solo e Sua Influência no Estado Trófico Dos Corpos Hídricos**

Restrições de Acesso ao Documento [Preenchimento obrigatório]

Documento confidencial: Não Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano:

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

1. O documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
2. Obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
3. Cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Rio Verde, 13 de novembro de 2024

Carlos Fernando de Oliveira Vasconcelos

Assinado eletronicamente pelo o Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Ciente e de acordo:

Lucas Peres Angelini

Assinatura eletrônica do(a) orientador(a)

Documento assinado eletronicamente por:

- Lucas Peres Angelini, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 13/11/2024 17:12:35.
- Carlos Fernando de Oliveira Vasconcelos, 2020102200740110 - Discente, em 13/11/2024 17:14:11.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 13/11/2024. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 652137
Código de Autenticação: c2cedd763b



INSTITUTO FEDERAL GOIANO
Campus Rio Verde
Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, 01, Zona Rural, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970
(64) 3624-1000



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 11/2024 - CCBEAMB-RV/GGRAD-RV/DE-RV/CMPRV/IFGOIANO

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO

No dia 06 de Novembro de 2024, às 19 horas, reuniu-se a banca examinadora composta pelos docentes: Lucas Peres Angelini (orientador), Raysa Moraes Castro (membro), Láine Garcia Ferreira (membro), para examinar o Trabalho de Curso intitulado “**Mapeamento Espaço Temporal do Uso e Ocupação do Solo e Sua Influência no Estado Trófico Dos Corpos Hídricos**” do estudante **Carlos Fernando de Oliveira Vasconcelos**, Matrícula nº 2020102200740110 do Curso de Engenharia Ambiental do IF Goiano – Campus Rio Verde. A palavra foi concedida ao estudante para a apresentação oral do Trabalho de Curso. Após a apresentação do estudante houve arguição do candidato pelos membros da banca examinadora. Após tal etapa, a banca examinadora reuniu-se e decidiu pela APROVAÇÃO do estudante. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata que segue assinada pelos membros da Banca Examinadora.

(Assinado Eletronicamente)

Lucas Peres Angelini

Orientador

(Assinado Eletronicamente)

Raysa Moraes Castro

Membro

(Assinado Eletronicamente)

Láine Garcia Ferreira

Membro

Observação:

() O(a) estudante não compareceu à defesa do TC.

Documento assinado eletronicamente por:

- **Lucas Peres Angelini, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 07/11/2024 07:30:24.
- **Laíne Garcia Ferreira, 2022202320140003 - Discente**, em 07/11/2024 08:08:56.
- **Raysa Moraes Castro, 2022102320140012 - Discente**, em 07/11/2024 19:19:14.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 06/11/2024. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 649682

Código de Autenticação: a469713cf1



INSTITUTO FEDERAL GOIANO

Campus Rio Verde

Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, 01, Zona Rural, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970

(64) 3624-1000

Regulamento de Trabalho de Curso (TC) – IF Goiano - Campus Rio Verde

ANEXO X – DECLARAÇÃO DE CORREÇÃO E NORMAS

Na condição de orientador do estudante **Carlos Fernando de Oliveira Vasconcelos**, matriculado no Curso de Bacharelado em Engenharia Ambiental, cujo Trabalho de Curso (TC) intitulado **“Mapeamento Espaço Temporal do Uso e Ocupação do Solo e Sua Influência no Estado Trófico Dos Corpos Hídricos”**, declaro que acompanhei as alterações propostas pela Banca Examinadora e que o TC está devidamente corrigido e formatado de acordo com as normas da instituição.

Rio Verde, 13 de Novembro de 2024.

Lucas Peres Angelini

Orientador

Documento assinado eletronicamente por:

- **Lucas Peres Angelini, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 13/11/2024 17:06:42.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 13/11/2024. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 652133

Código de Autenticação: daaa8da018



DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à todos que estiveram comigo nessa caminhada maravilhosa na qual fui percebendo que à vida retribui todas as coisas boas que você deixou plantada buscando sempre ser a melhor pessoa possível todos os dias.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me conceder força e perseverança ao longo desta jornada. Aos meus pais, Wallace e Cristiane, irmãos André e Tcharles e minha filha, Fernanda, minha eterna gratidão pelo apoio incondicional e por estarem sempre ao meu lado nos momentos mais desafiadores. Agradeço também aos meus amigos, que foram fundamentais, oferecendo auxílio e incentivo em cada etapa deste caminho. Aos meus professores, especialmente, Édio Damasio, Lucas Peres, Patricia Caldeira e Bruno Couto, por me proporcionarem a capacidade de discernimento necessária. A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, meu sincero muito obrigado.

RESUMO

O presente estudo destaca a importância do monitoramento da qualidade hídrica e do uso de ferramentas que avaliem a saúde ambiental de corpos d'água. Considerando os altos custos e as limitações espaciais e temporais associados ao monitoramento *in situ*, técnicas de sensoriamento remoto têm sido amplamente empregadas para estimar o estado trófico de corpos hídricos. O objetivo deste projeto foi mapear o uso e a ocupação do solo nas bacias hidrográficas dos rios Verdão e dos Bois, avaliando sua influência no estado trófico dos corpos d'água. Para tanto, foram utilizados dados de uso e ocupação do solo disponibilizados pela plataforma MapBiomas, cobrindo o período de 1985 a 2021, além de dados orbitais do sensor WPM do satélite CBERS-4A, obtidos por meio da plataforma do INPE. O índice de estado trófico (IET), proposto por Carlson (1977), foi calculado a partir da relação entre as refletâncias espectrais e a concentração de clorofila-a, conforme modelos descritos na literatura (Wang et al., 2008). A metodologia adotada incluiu uma abordagem bibliográfica e descritiva para analisar a influência das atividades antrópicas no uso do solo sobre a qualidade da água e o estado trófico dos rios. Os principais resultados indicam que, durante o período chuvoso, os níveis de clorofila-a e o Índice de Estado Trófico (IET) ultrapassaram os limites estabelecidos, demonstrando uma significativa influência do uso do solo. No entanto, a análise apresentou limitações devido ao uso restrito de imagens de satélite e ausência de análises diretas da qualidade da água. Recomenda-se o aumento da resolução temporal para realizar análises detalhadas da água e do solo. Conclui-se que o monitoramento do estado trófico por meio de imagens de satélite é viável, mas para uma melhoria contínua alinhar monitoramentos *in situ* resultados mais precisos e comprobatórios para assertividades futuras e a não necessidade de monitoramento local. A implementação de sistemas de monitoramento ambiental é essencial para mitigar impactos nas bacias hidrográficas.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto. Qualidade da água. Uso e ocupação do Solo. Índices espectrais. Estado trófico.

ABSTRACT

This study highlights the importance of monitoring water quality and utilizing tools to assess the environmental health of water bodies. Considering the high costs and spatial-temporal limitations associated with *in situ* monitoring, remote sensing techniques have been widely employed to estimate the trophic state of aquatic ecosystems. The objective of this project was to map land use and land cover in the Verdão and Bois river basins, evaluating their influence on the trophic state of water bodies. To achieve this, land use and cover data provided by the MapBiomas platform, covering the period from 1985 to 2021, were used alongside orbital data from the WPM sensor of the CBERS-4A satellite, accessed through the INPE platform. The trophic state index (TSI), proposed by Carlson (1977), was calculated based on the relationship between spectral reflectance and chlorophyll-a concentration, following models described in the literature (Wang et al., 2008). The methodology adopted a bibliographic and descriptive approach to analyze the influence of anthropogenic activities related to land use on water quality and the trophic state of rivers. The main results indicate that during the rainy season, chlorophyll-a levels and the TSI exceeded the established limits, demonstrating a significant influence of land use on water quality. However, the analysis presented limitations due to the restricted use of satellite images and the absence of direct water quality assessments. It is recommended to increase the temporal resolution of analyses to enable more detailed evaluations of both water and soil. Additionally, aligning *in situ* monitoring with satellite-based methods is crucial to achieve more accurate and reliable results, potentially reducing the need for local monitoring in the future. In conclusion, monitoring the trophic state using satellite imagery is a feasible approach. However, continuous improvement requires integrating *in situ* methods to ensure precision and support future validations. The implementation of robust environmental monitoring systems is essential to mitigate impacts on river basins and promote their sustainable management.

Keywords: Remote sensing. Water quality. Land use and land cover. Spectral indices. Trophic state.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 01 – Área da Bacia Rio dos Bois / Rio Verdão e área de estudo..... | 24 |
| Figura 02 - Uso do solo 2020-1985..... | 28 |
| Figura 03 – Clorofila-A em mg/L..... | 32 |
| Figura 04 – Índice de Estado Trófico..... | 33 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 01 – Classificação do IET por estados tróficos..... | 27 |
| Tabela 02 – Relação de uso do solo para o ano de 1985 na bacia hidrográfica do São Tomaz..... | 29 |
| Tabela 03 – Relação de uso do solo para o ano de 2022 na bacia hidrográfica do São Tomaz..... | 30 |

LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|--------|--|
| APP | Áreas de Preservação Permanente |
| BHRV | Bacia Hidrográfica do Rio Verdinho |
| CLA | Clorofila A |
| CONAMA | Conselho Nacional do Meio Ambiente |
| GEE | <i>Google Earth Engine</i> |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| IET | Índice de Estado Trófico |
| ILPF | Integração Lavoura-Pecuária-Floresta |
| INPE | Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais |
| LCLU | Uso e Cobertura da Terra (<i>Land Use and Land Cover</i>) |
| MDE | Modelos digitais de elevação |
| MDT | Modelo digital de terreno |
| MNDWI | <i>Modified Normalised Difference Water Index</i> |
| NDBaI | <i>Normalized Difference Bareness Index</i> |
| NDBI | <i>Normalized Difference Builtup Index</i> |
| NDVI | <i>Normalized Difference Vegetation Index</i> |
| NDWI | <i>Normalized Difference Water Index</i> |
| ONU | Organização das Nações Unidas |
| PNRH | Política Nacional de Recursos Hídricos |
| QGis | <i>Quantum Gis</i> |
| SIG | Sistema de Informação Geográfica |
| SIGA | Sistema de Informações Geográficas Ambientais do Estado de Goiás |
| SR | Sensoriamento Remoto |
| UTM | Universal Transversa de Mercator |
| WGS 84 | <i>World Geodetic System</i> |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 13 |
| 2 REVISÃO DA LITERATURA | 16 |
| 2.1 Mapeamento Espaço Temporal | 16 |
| 2.2 Uso e ocupação do solo | 17 |
| 2.3 Recursos hídricos..... | 19 |
| 2.4 Estado trófico..... | 21 |
| 3 MATERIAL E MÉTODOS | 24 |
| 3.1 Área de estudo..... | 23 |
| 3.2 Dados da plataforma MAPBIOMAS..... | 24 |
| 3.3 Dados radiométricos de sensores orbitais..... | 25 |
| 3.4 Estimativa do índice trófico modificado..... | 26 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 28 |
| 5 CONCLUSÃO..... | 35 |
| REFERÊNCIAS | |

1 INTRODUÇÃO

A qualidade ambiental, em especial, a da água são temas amplamente discutidos nos últimos anos. A água doce por ser um recurso finito com alto valor agregado, tem centrado inúmeras discussões na comunidade científica. As crises no Brasil e no mundo por conta da escassez de água doce é uma realidade observada já há alguns anos. Esse cenário confronta-se com a alta demanda desses recursos natural para o desenvolvimento humano e agroindustrial, gerando assim, um paradigma a ser superado pela geração atual e futura (REBOUÇAS, 2003).

De acordo com Santos (2021), as águas superficiais são atualmente a principal fonte de água doce para o abastecimento público no Brasil. Porciuncula (2021) complementa, destacando que a redução da vazão nos corpos hídricos, associada à perda da qualidade da água, representa um grande risco de colapso para o sistema de abastecimento em algumas regiões.

Com relação a degradação da qualidade ambiental dos corpos hídricos superficiais, alguns estudos têm demonstrado que é evidente a piora em parâmetros como turbidez, sólidos dissolvidos, presença de metais e elevação de massa algal (COSTA, *et al.* 2021). A perda da qualidade ambiental reflete em maiores custos no processo de tratamento, elevando assim o preço da água tratada para a população. Além disso, há maiores riscos de contaminação por substâncias recalcitrantes no processo de tratamento (MATTIUIZI E MARQUES, 2019).

Diante dos desafios impostos pelos altos custos e pelas restrições espaciais e temporais dos monitoramentos *in situ*, técnicas de sensoriamento remoto têm sido amplamente utilizadas para estimar o estado trófico de corpos d'água (LAMPARELLI, 2004; SHEELA *et al.*, 2011; MACHADO & BAPTISTA, 2016), além de avaliar sua relação com as alterações no uso e ocupação do solo (SHARMA *et al.*, 2013).

As técnicas de classificação de uso do solo têm sido aplicadas em diversas linhas de pesquisa para compreender a magnitude do avanço das atividades antrópicas no espaço e no tempo (SHARMA *et al.*, 2013). Nesse sentido, inúmeros projetos para classificação de uso do solo foram desenvolvidos em diversos países, destacando-se no Brasil o projeto MapBiomias. Sua plataforma permite o acesso de uma série de produtos, tais como, mapa de uso de cobertura da terra, superfície da água, cicatrizes de queimadas entre outros (MAPBIOMAS, 2022).

Essas informações podem ser aplicadas em uma série de estudos ambientais, por exemplo, o efeito da mudança do uso da terra e no estado trófico da água. O estado trófico da água é um parâmetro que avalia a qualidade da água quanto ao enriquecimento por nutrientes

(LAMPARELLI, 2004). Sheela (2011) complementa que este parâmetro indica o estado da água em relação a possíveis poluições.

O conhecimento a respeito do estado dos corpos hídricos no caso de Rio Verde – GO se torna de vital relevância, tendo em vista o intensivo uso do solo para atividades agrícola e industrial. Na região sudoeste goiana, uma parcela considerável de água distribuída à população é feita pelo sistema público de abastecimento advindo de captação superficial, ou seja, há uma forte dependência dos mananciais superficiais (GARCIA et al., 2007). Sendo assim, o monitoramento dos corpos hídricos com a integração de técnicas sensoramento remoto é uma importante ferramenta de gestão de grandes regiões e pode nortear políticas públicas de gestão de recursos hídricos.

No Brasil, a Política Nacional de Recursos Hídricos – PNRH (lei 9.433/97; BRASIL, 1997) trouxe uma série de avanços para a gestão desses recursos. Inicialmente estabeleceu como um dos seus objetivos “assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos”. Nesse sentido, a PNRH reforçou a necessidade do monitoramento da qualidade das águas, com isso, uma série de estudos focaram no monitoramento das bacias hidrográficas utilizando dados espaciais (SILVA *et al.*, 2014; ALVES *et al.*, 2016).

De acordo com Alves (2018), alguns estudos foram desenvolvidos para monitorar a qualidade da água utilizando índices da qualidade da água e estado trófico. O estudo da qualidade água utilizando resposta espectral de sensores orbitais tem sido objeto de uma série de estudos no mundo, mas com ampla aplicação na China por conta da grande contribuição de efluentes despejados diretamente em corpos hídricos sem prévio tratamento (WANG et al., 2008; LIANG, et al., 2017; SHI et al., 2019; HU et al., 2021a). Esses índices relacionam de forma empírica as concentrações de clorofila a turbidez e presença de algas com a resposta espectral das bandas de sensores orbitais, em especial, bandas da faixa do vermelho, verde, azul e infravermelho próximo (WANG et al., 2008; LIANG, et al., 2017; SHI et al., 2019; HU et al., 2021).

No Brasil, o estudo mais proeminente sobre o Índice de Estado Trófico (IET) foi adaptado por Lamparelli (2004) e reaplicado em uma série de bacias (ALVES et al., 2017). Contudo, esses estudos baseiam-se em dados pontuais *in loco*. Atualmente, poucos trabalhos têm sido desenvolvidos com o objetivo de adaptar modelos espectrais para análises da qualidade da água. De forma geral, esses modelos estabelecem relações, por meio de regressões e correlações, entre as concentrações de indicadores e suas respostas espectrais, permitindo a estimativa de parâmetros como o Índice de Estado Trófico (IET), índice de

turbidez, índice de biomassa algal e concentração de clorofila-a (WANG et al., 2008; LIANG et al., 2017; SHI et al., 2019; HU et al., 2021).

Atualmente, poucos trabalhos têm sido desenvolvidos com o objetivo de adaptar modelos espectrais para análises da qualidade da água. De forma geral, esses modelos estabelecem relações, por meio de regressões e correlações, entre as concentrações de indicadores e suas respostas espectrais, permitindo a estimativa de parâmetros como o Índice de Estado Trófico (IET), índice de turbidez, índice de biomassa algal e concentração de clorofila-a (WANG et al., 2008; LIANG et al., 2017; SHI et al., 2019; HU et al., 2021).

A classificação do uso e ocupação da terra consiste no agrupamento de pixel ou valores em classes definidas de acordo com o objetivo e objeto do estudo (IBGE 2013). Esse procedimento avançou significativamente nas últimas décadas com o surgimento de sensores de média e baixa resolução espacial e com bandas espectrais que permitiram o cálculo de novos índices espectrais, tais como NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada), NDBI (Índice de Áreas Construídas por Diferença Normalizada), NDBaI (Índice de Exposição do Solo por Diferença Normalizada), NDWI (Índice de Água por Diferença Normalizada) e MNDWI (Índice Modificado de Água por Diferença Normalizada), (SHARMA et al., 2013; TALUKDAR et al., 2020). Associado a evolução dos dados orbitais, as técnicas de classificação do uso e ocupação do solo também evoluíram. Os softwares SIGs (Sistemas de Informação Geográficas) já possuem em seus bancos de algoritmos sistemas de classificação semiautomáticos e automáticos (ROGAN E CHEN, 2004).

Esses métodos estão baseados no sistema de treinamento a partir de amostras, onde o operador coleta manualmente amostras de pixel dentro da área de estudo. Com base nessas amostras o software irá avaliar a assinatura espectral dos pixels da área de estudo para criação de intervalos de valores, agrupando assim, em classes estabelecidas (ALVES et al. 2019). Esses métodos possuem razoável eficiência para grandes áreas, como por exemplo, bacia hidrográficas ou área de municípios (ALVES et al., 2016;2019).

Novas metodologias baseadas em aprendizado de máquinas, como sistemas de decisão hierárquica (árvores de decisão), métodos estatísticos, lógica fuzzy, e classificadores de máxima verossimilhança, têm sido amplamente aplicadas em estudos sobre uso e ocupação da terra (SHARMA et al., 2013; NOSZCZYK, 2019; TALUKDAR et al., 2020). Dentre essas metodologias, as árvores de decisão hierárquicas destacam-se por sua simplicidade computacional e pela capacidade de integrar características do terreno, tornando-se eficazes em aplicações espacotemporais, incluindo áreas urbanas (YANG et al., 2017).

Nesse contexto, o Mapbiomas, uma iniciativa lançada em 2015, adota essas técnicas

avançadas para oferecer produtos de baixo custo e alta precisão na classificação do uso do solo. O projeto, que reúne universidades, ONGs e empresas de tecnologia, utiliza o método Random Forest, uma técnica de aprendizado supervisionado baseada em árvores de decisão, para processar dados do satélite Landsat. Esse processo envolve uma série de etapas, incluindo treinamento, classificação e pós-processamento, que resultam em uma classificação detalhada do uso e ocupação da terra em macro e microclasses. Dessa forma, o Mapbiomas exemplifica a aplicação prática das metodologias de aprendizado de máquinas na análise e monitoramento do uso do solo, reforçando a importância dessas técnicas na geração de informações precisas e acessíveis sobre as dinâmicas territoriais.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Mapeamento Espaço Temporal

O mapeamento espaço-temporal é uma ferramenta fundamental para a representação e análise de fenômenos geográficos que ocorrem ao longo do tempo, oferecendo uma visão detalhada das transformações que se manifestam em diferentes escalas espaciais e temporais. De acordo com Singh (1989), essa técnica integra informações geoespaciais com uma dimensão temporal, permitindo a criação de mapas dinâmicos que ilustram a evolução de padrões e processos naturais ou antropogênicos. Essa abordagem é amplamente utilizada em diversas disciplinas, como geografia, ecologia, urbanismo e gestão de recursos naturais, devido à sua capacidade de revelar mudanças que ocorrem ao longo do tempo, as quais poderiam passar despercebidas em análises estatísticas.

No contexto de ecologia e gestão ambiental, o mapeamento espaço-temporal tem sido utilizado para monitorar mudanças na cobertura vegetal, variações na qualidade dos corpos hídricos e a expansão de áreas urbanas. Cassman (2005) argumenta que essa técnica é crucial para entender como as atividades humanas, como o desmatamento e a agricultura extensiva, impactam a biodiversidade e os ecossistemas ao longo do tempo. O mapeamento espaço-temporal fornece uma base de dados robusta para a elaboração de políticas de conservação e planejamento sustentável, facilitando a identificação de áreas críticas que necessitam de intervenção.

O mapeamento espaço-temporal também é amplamente aplicado na gestão de recursos hídricos, onde a análise das mudanças temporais na qualidade da água das bacias hidrográficas

permite uma gestão mais eficaz e eficiente. Conforme destacado por Mantelli (2012), ao rastrear as alterações no uso do solo e seus impactos sobre os corpos hídricos, os gestores podem tomar decisões mais informadas sobre a alocação de recursos e a implementação de medidas de proteção ambiental.

O mapeamento espaço-temporal oferece uma abordagem integrada e multifacetada para a análise de fenômenos geográficos, permitindo não apenas a visualização das mudanças ao longo do tempo, mas também a compreensão dos processos subjacentes que impulsionam essas mudanças. Como tal, ele se torna uma ferramenta indispensável para pesquisadores e profissionais que buscam compreender e gerir de forma sustentável os recursos naturais e o espaço geográfico. A sua aplicação em diversos contextos evidencia a importância dessa técnica para o planejamento e a gestão do território, especialmente em um mundo onde as mudanças ambientais e sociais ocorrem em ritmos cada vez mais acelerados (SILVA, *et al.*, 2016).

2.2 Uso e ocupação da terra

O uso e a ocupação da terra têm sido temas centrais em estudos ambientais, urbanos e agrícolas, dada a sua influência direta sobre a sustentabilidade dos recursos naturais e o equilíbrio dos ecossistemas. A classificação e o monitoramento do uso da terra são essenciais para compreender as dinâmicas espaciais e temporais das paisagens, especialmente em regiões sujeitas a pressões antrópicas intensas e intervenção humana direta.

Nos últimos anos, o avanço das tecnologias de sensoriamento remoto e dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) tem revolucionado a forma como o uso do solo é analisado e monitorado. As técnicas de sensoriamento remoto permitem a coleta de dados em larga escala, possibilitando a análise detalhada de grandes áreas geográficas com alta precisão. Esses métodos incluem a utilização de imagens de satélite e imagens aéreas, que, quando processadas, permitem classificar o uso e a cobertura do solo em diferentes categorias, como florestas, áreas agrícolas, corpos d'água e zonas urbanas.

A classificação do uso e ocupação da terra é geralmente realizada por meio de algoritmos que analisam a resposta espectral dos diferentes tipos de cobertura do solo. Esses métodos envolvem a agrupamento de pixels em classes específicas de uso, baseando-se nas características espectrais detectadas pelos sensores. Com a evolução das tecnologias, índices como o NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) e o NDBI (Índice de Diferença Normalizada de Construção) tornaram-se comuns para distinguir vegetação de áreas

urbanizadas e solos expostos (SHARMA *et al.*, 2013).

O IBGE (2020) dá continuidade à disponibilização de resultados do monitoramento da cobertura e uso da terra do Brasil, estudo que vem sendo divulgado desde 2015 e representa um importante instrumento de suporte e orientação a ações gerenciais e tomadas de decisão sobre o tema. A presente publicação contempla o período de 2018 a 2020, e seus resultados permitem a detecção de alterações na dinâmica das formas de ocupação e de organização do espaço ao longo do tempo, considerando-se a série histórica já disponibilizada. Tais informações, cumpre destacar, têm fornecido importantes subsídios aos estudos da contabilidade ambiental, como as contas de ecossistemas e as contas econômicas ambientais da terra, nas quais, mediante a integração de dados estatísticos e geoespaciais, são estimados os estoques e os fluxos de utilização dos ativos naturais. Com esses resultados, espera-se contribuir para a derivação de estudos sobre as transformações ocorridas nas formas de ocupação do Território Nacional.

O impacto do uso e ocupação do solo sobre os ecossistemas e recursos hídricos tem sido amplamente documentado. Alves *et al.* (2016) destacam que a expansão agrícola leva à degradação da vegetação nativa e à alteração nos processos hidrológicos, resultando em perda de biodiversidade e aumento da erosão do solo. Esse cenário é especialmente preocupante em áreas onde a agricultura intensiva afeta ecossistemas sensíveis.

Estudos realizados na bacia hidrográfica do Rio Verdão revelaram que a conversão de áreas naturais para a agricultura, particularmente para o cultivo de soja, tem causado um aumento significativo na quantidade de sedimentos e nutrientes transportados para os corpos hídricos (PEREIRA *et al.*, 2016). Essa situação agrava o problema da eutrofização, que é o enriquecimento dos corpos d'água com nutrientes como fósforo e nitrogênio, resultando na proliferação descontrolada de algas e na deterioração da qualidade da água (LAMPARELLI, 2004).

Além disso, a urbanização e o crescimento desordenado das cidades contribuem para a impermeabilização do solo, aumento do escoamento superficial e redução da infiltração de água, intensificando o risco de inundações e a contaminação de aquíferos, a impermeabilização do solo impede a infiltração natural da água, que, ao ser direcionada para a superfície, pode transportar poluentes provenientes de atividades urbanas, como substâncias químicas, metais pesados e resíduos orgânicos. (SILVA *et al.*, 2014). A ocupação inadequada de encostas e margens de rios, frequentemente observada em áreas urbanas, também exacerba os processos de erosão e deslizamentos de terra, colocando em risco tanto o meio ambiente quanto a segurança das populações locais.

O monitoramento contínuo do uso e ocupação do solo é fundamental para a gestão eficaz dos recursos naturais e a mitigação dos impactos ambientais. No Brasil, iniciativas como o projeto MapBiomas têm desempenhado um papel crucial ao fornecer dados detalhados e atualizados sobre as mudanças no uso do solo em todo o território nacional. MapBiomas utiliza imagens do satélite Landsat e técnicas avançadas de classificação para gerar mapas anuais de uso e cobertura da terra, que são amplamente utilizados em estudos ambientais e no planejamento de políticas públicas (MAPBIOMAS, 2022).

Apesar dos avanços tecnológicos, a gestão do uso do solo ainda enfrenta desafios significativos. Um dos principais desafios é a integração de dados de diferentes fontes e resoluções espaciais, o que pode dificultar a criação de um panorama completo e preciso das mudanças na paisagem. Além disso, a falta de políticas públicas eficazes e a pressão constante por expansão agrícola e urbana continuam a ameaçar a sustentabilidade dos ecossistemas e a qualidade dos recursos hídricos.

Portanto, é imperativo que se adotem práticas de uso do solo mais sustentáveis, que equilibrem as necessidades econômicas com a preservação ambiental. A implementação de técnicas conservacionistas, como o plantio direto e o manejo integrado de bacias hidrográficas. Esse tipo de manejo reconhece que as bacias hidrográficas são sistemas complexos, nos quais os processos hídricos, a vegetação, a fauna, o solo e as atividades humanas estão interconectados e devem ser geridos de forma integrada e balanceada, pode contribuir para a redução dos impactos negativos associados ao uso intensivo do solo, promovendo a conservação da biodiversidade e a qualidade da água em longo prazo.

2.3 Recursos hídricos

Os recursos hídricos desempenham um papel essencial na manutenção da vida no planeta, sendo fundamentais para o desenvolvimento de atividades humanas como agricultura, indústria, abastecimento doméstico e geração de energia. No entanto, a crescente demanda por água, combinada com a poluição e a má gestão, tem colocado os sistemas hídricos em risco. O desafio atual reside na gestão sustentável desses recursos, buscando equilibrar as necessidades humanas com a preservação dos ecossistemas.

A água é um dos elementos naturais mais críticos para o desenvolvimento sustentável. Além de ser um componente vital para a sobrevivência de seres vivos, os recursos hídricos sustentam atividades econômicas e industriais, desempenhando um papel central na agricultura, geração de energia hidrelétrica e processos industriais. O uso eficiente e

sustentável da água é essencial para garantir a continuidade das atividades humanas, além de preservar os ecossistemas aquáticos (ANA, 2020).

As bacias hidrográficas, áreas que captam e drenam a água da chuva para rios e lagos, são elementos centrais na dinâmica hídrica. Elas regulam a disponibilidade de água em regiões específicas, influenciando tanto a quantidade quanto a qualidade da água disponível para consumo e uso humano.

Embora os recursos hídricos sejam renováveis, sua disponibilidade não é infinita e varia significativamente de acordo com fatores geográficos, climáticos e socioeconômicos. No Brasil, por exemplo, há uma grande concentração de recursos hídricos na região Norte, enquanto outras regiões, como o Nordeste, enfrentam escassez hídrica periódica. Além disso, a má gestão e a poluição têm comprometido a qualidade da água em diversas partes do mundo.

A contaminação das águas, seja por despejo inadequado de esgoto, poluentes industriais ou uso excessivo de fertilizantes na agricultura, é um dos principais desafios da gestão de recursos hídricos. Esses contaminantes afetam a qualidade da água, colocando em risco a saúde humana e a biodiversidade aquática. A poluição difusa, que ocorre principalmente em áreas agrícolas e urbanas, representa uma fonte significativa de degradação dos corpos d'água.

A gestão sustentável dos recursos hídricos envolve um conjunto de práticas voltadas para a preservação e uso racional da água. Uma das principais abordagens adotadas é a gestão integrada de bacias hidrográficas, que considera o uso múltiplo da água, o planejamento do uso do solo e a conservação dos ecossistemas associados aos corpos d'água. A Política Nacional de Recursos Hídricos do Brasil, estabelecida pela Lei nº 9.433/1997, é um exemplo de legislação que busca garantir o uso sustentável da água por meio da descentralização e da participação da sociedade (ANA, 2020).

A gestão integrada propõe que o uso dos recursos hídricos seja planejado e coordenado, considerando os impactos em toda a bacia hidrográfica, e não apenas em setores isolados. Isso inclui a promoção do uso eficiente da água na agricultura e na indústria, a recuperação de nascentes e a proteção das áreas de recarga dos aquíferos.

A Política Nacional de Recursos Hídricos no Brasil estabeleceu uma série de instrumentos voltados para a gestão e conservação da água. Entre esses instrumentos estão os Comitês de Bacia Hidrográfica, que são responsáveis por propor, discutir e aprovar planos de gestão das águas, assim como a cobrança pelo uso da água e o sistema de outorga, que regulamenta a distribuição desse recurso entre os diferentes usuários (TUNDISI & MATSUMURA-TUNDISI, 2008).

Outro importante instrumento de gestão é a cobrança pelo uso da água, que incentiva o uso consciente e reduz o desperdício. A arrecadação desses recursos é revertida para a melhoria da infraestrutura hídrica e a preservação dos ecossistemas aquáticos.

Entre os maiores desafios da gestão hídrica estão a crescente demanda por água, impulsionada pelo aumento da população e o desenvolvimento econômico, e as mudanças climáticas, que têm alterado o regime de chuvas e intensificado eventos extremos, como secas e inundações. A escassez de água em determinadas regiões, combinada com o aumento da demanda, coloca em risco a sustentabilidade dos recursos hídricos a longo prazo (ESTRELA & VARGAS, 2012).

Outro desafio importante é o controle da poluição dos corpos d'água, principalmente em áreas urbanas e agrícolas. A falta de tratamento adequado de esgoto e a utilização excessiva de insumos agrícolas, como fertilizantes e pesticidas, têm comprometido a qualidade da água. Além disso, a degradação das matas ciliares e a urbanização desordenada agravam a erosão do solo e o assoreamento dos rios.

A conservação dos recursos hídricos passa pela proteção das áreas de recarga de aquíferos, a recuperação de matas ciliares e a adoção de práticas agrícolas sustentáveis. O uso eficiente da água na agricultura, que responde por grande parte do consumo de água doce no mundo, é fundamental para a preservação desse recurso. Práticas como a irrigação por gotejamento e o manejo adequado do solo podem reduzir significativamente o uso de água na produção agrícola (MOLLE & BERKOFF, 2007).

No setor industrial, a adoção de tecnologias de reuso e tratamento da água tem se mostrado uma solução eficaz para reduzir o consumo e minimizar a poluição hídrica. Programas de conscientização e educação ambiental também desempenham um papel crucial na sensibilização da sociedade sobre a importância da conservação dos recursos hídricos.

A gestão dos recursos hídricos é uma questão complexa que exige ações integradas e colaborativas entre governos, sociedade civil e setores produtivos. A adoção de políticas públicas que promovam o uso sustentável da água, aliada à implementação de tecnologias de tratamento e conservação, é essencial para garantir a disponibilidade de água para as gerações futuras. Além disso, a proteção dos ecossistemas aquáticos deve ser prioridade para que os serviços ambientais proporcionados pelos recursos hídricos sejam preservados.

2.4 Estado trófico

O estado trófico de ecossistemas aquáticos refere-se à quantidade de nutrientes

presentes em corpos d'água, como lagos, rios e reservatórios, e sua capacidade de sustentar a vida biológica. Com a intensificação das atividades humanas, como a agricultura e o descarte inadequado de esgoto, muitos desses ambientes passaram a sofrer com a eutrofização, um processo caracterizado pelo acúmulo excessivo de nutrientes, que causam efeitos adversos à qualidade da água e à biodiversidade.

O estado trófico é utilizado para classificar corpos d'água conforme o nível de nutrientes e a consequente produtividade biológica. Essa classificação geralmente é dividida em quatro categorias: oligotrófico, com baixa concentração de nutrientes; mesotrófico, com uma quantidade moderada de nutrientes; eutrófico, com alta concentração de nutrientes; e hipereutrófico, onde os níveis de nutrientes são extremamente altos (SILVA & BARBOSA, 2013). A mudança de um estado para outro pode ocorrer naturalmente ou ser acelerada pelas atividades humanas.

A eutrofização é o processo de enriquecimento por nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo, que resulta no aumento excessivo da produtividade primária, como a proliferação de algas e cianobactérias. Esse processo é acelerado por fontes externas de nutrientes, como o esgoto doméstico, fertilizantes agrícolas e resíduos industriais (ESTEVES, 2011). A eutrofização pode provocar uma série de problemas, incluindo a diminuição da concentração de oxigênio na água, conhecida como hipóxia, que afeta negativamente a fauna aquática e pode resultar na morte de peixes.

Além disso, o excesso de nutrientes favorece o crescimento descontrolado de algas e plantas aquáticas, o que compromete a qualidade da água, dificultando seu uso para abastecimento humano, recreação e outras finalidades (TUNDISI & MATSUMURA-TUNDISI, 2008).

A avaliação do estado trófico dos corpos d'água é realizada com base em indicadores que medem a concentração de nutrientes e a produção de biomassa. Um dos métodos mais amplamente utilizados é o Índice de Estado Trófico (IET), que foi inicialmente desenvolvido por Carlson (1977) e adaptado para as condições brasileiras por Lamparelli (2004). O IET considera fatores como a transparência da água, a concentração de fósforo total e os níveis de clorofila-a que indicam a quantidade de algas presentes.

De acordo com Henry (2003), o uso desse índice em ecossistemas aquáticos brasileiros tem sido eficaz na avaliação dos níveis de trofia e na orientação das ações de gestão para melhorar a qualidade da água.

A ação humana é o principal fator responsável pela intensificação da eutrofização em ambientes aquáticos. O lançamento inadequado de esgoto sem tratamento adequado, o uso

excessivo de fertilizantes na agricultura e a ocupação desordenada do solo próximo aos corpos d'água são algumas das principais fontes de nutrientes que promovem o aumento da trofia (SALAS & MARTÍNEZ, 2014). Regiões urbanas e agrícolas são as mais vulneráveis a esses impactos, uma vez que a concentração populacional e as práticas agrícolas intensivas frequentemente resultam no acúmulo de nutrientes nos cursos d'água.

A eutrofização não afeta apenas a qualidade da água, mas também altera profundamente a estrutura dos ecossistemas aquáticos. O aumento da quantidade de nutrientes favorece a proliferação de algas e cianobactérias, muitas das quais são tóxicas para a vida aquática e podem representar riscos à saúde humana. A perda de oxigênio na água, causada pela decomposição da biomassa em excesso, cria condições anóxicas que comprometem a fauna aquática, levando à morte de peixes e outros organismos dependentes do oxigênio (ESTEVES, 2011).

Essa situação também afeta os serviços ecossistêmicos, como a pesca e o turismo, prejudicando a economia local e a qualidade de vida das populações que dependem diretamente desses recursos (CUNHA *et al.*, 2013).

Diversas estratégias podem ser adotadas para controlar a eutrofização e mitigar seus impactos. Entre as principais medidas estão o controle da entrada de nutrientes por meio da melhoria no tratamento de esgoto e do manejo sustentável de fertilizantes agrícolas. Também são utilizadas tecnologias de recuperação ambiental, como a dragagem de sedimentos contaminados e o manejo de plantas aquáticas que absorvem nutrientes (JØRGENSEN *et al.*, 2014).

Nos últimos anos, soluções baseadas na natureza, como o uso de plantas aquáticas para a fitorremediação e o aumento da vegetação ripária, têm ganhado destaque como formas sustentáveis de controle da eutrofização (MATSUMURA-TUNDISI & TUNDISI, 2017).

No Brasil, a gestão da qualidade da água e o controle da eutrofização são regulamentados por uma série de legislações, como a Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei nº 9.433/1997), que promove a gestão integrada dos recursos hídricos. A Resolução CONAMA nº 357/2005, que estabelece os padrões de qualidade das águas, também desempenha um papel fundamental no controle da poluição e na preservação dos corpos d'água (ANA, 2020).

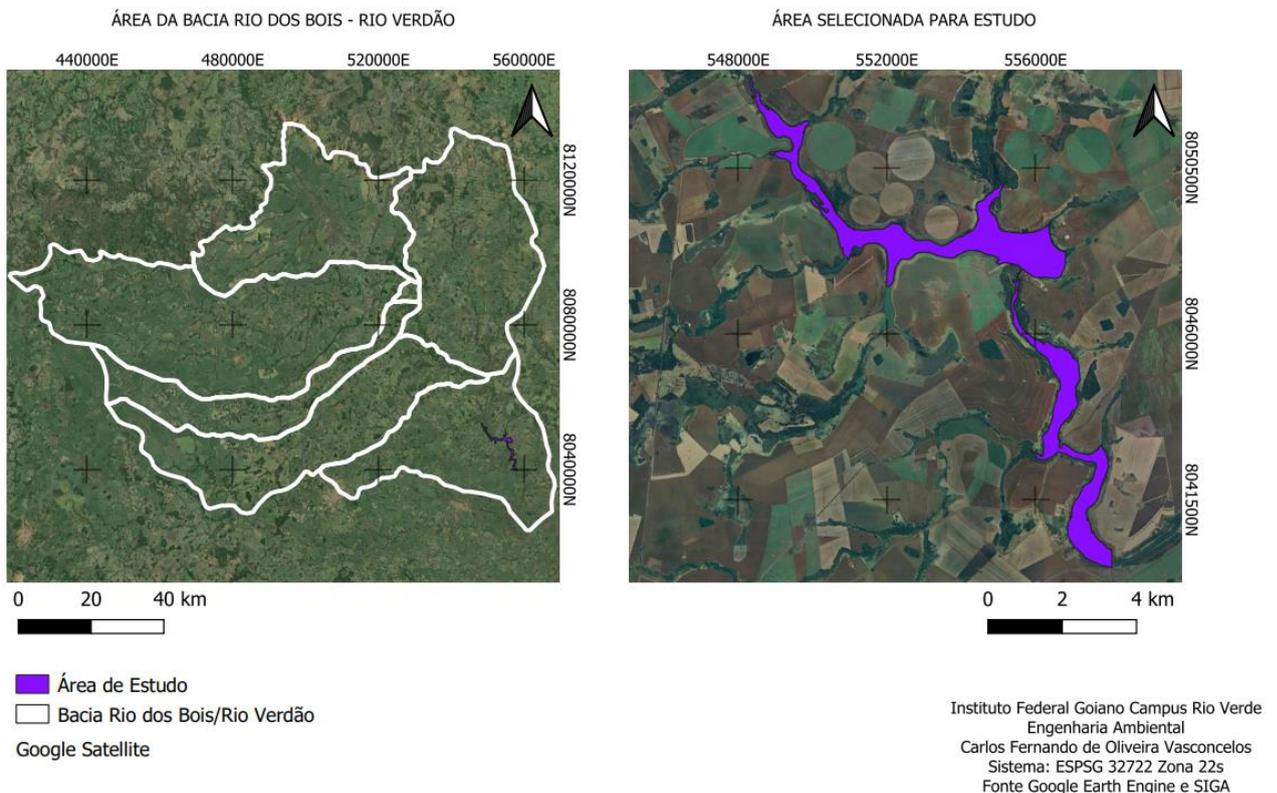
Além disso, programas de recuperação de bacias hidrográficas, como o Programa Produtor de Água, incentivam práticas de conservação em áreas de mananciais, ajudando a reduzir a carga de nutrientes que atinge os corpos d'água (ANA, 2020).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de Estudo

A área de estudo serão os trechos das bacias hidrográficas do Rio Verdão e dos Bois localizadas na microrregião Sudoeste do Estado de Goiás, Centro-Oeste brasileiro conforme ilustrado na figura 01. Os trechos das bacias hidrográficas compreendem 22 municípios do estado de Goiás, sendo eles: Rio Verde, Cachoeira Dourada, Inaciolândia, Gouvelândia, Quirinópolis, Itumbiara, Panamá, Castelândia, Bom Jesus de Goiás, Maurilândia, Goiatuba, Porteirão, Joviânia, Santa Helena de Goiás, Vicentinópolis Turvelândia, Santo Antônio da Barra, Edéia, Acreúna, Rio Verde Montividiu, Paraúna e Caiapônia. O corpo hídrico selecionados devera possuir largura do leito de pelo mesmo 90 metros para aplicação da metodologia. Nesse sentido, serão priorizadas regiões mais próximas ao exultório da bacia, tendo em vista a resolução espacial do estudo de 30 metros. O corpo hídrico selecionado para o estudo foi a Barragem Mirante da Barragem Verde 8, figura 01, garantindo a representatividade da área e a precisão na aplicação da metodologia de análise de uso e ocupação do solo e seu impacto no estado trófico.

Figura 01 – Área da Bacia Rio dos Bois / Rio Verdão e área de estudo



Fonte: Google Earth Engine e SIGA

3.2 Dados da plataforma mapbiomas

Serão utilizados dados de uso e ocupação da terra da plataforma mapbiomas entre os anos de 1985 – 2021. Os dados serão obtidos através dos toolkits preparados no *Google Earth Engine* (GEE). O GEE permite filtrar e realizar o download com base em informações, tais como: biomas, estados e cidades, possibilitando a aquisição do produto selecionado via google drive (MAPBIOMAS, 2022). As imagens serão adquiridas no formato Geotiff no sistema de projeção UTM datum WGS 84.

3.3 Dados radiométricos de sensores orbitais

As imagens de refletância da superfície, já corrigidas dos efeitos da atmosfera, foram obtidas utilizando dados do satélite CBERS 4A. As imagens serão baixadas gratuitamente através da plataforma do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) – Catálogo de Imagens (<http://www.dgi.inpe.br/catalogo/explore>), baseando-se na localização geográfica (latitude e longitude). O processamento das imagens será realizado com o software QGIS 3.16. No catálogo de imagens, é necessário definir a área de estudo e o intervalo de tempo a ser analisado, garantindo que a cobertura do satélite abranja a região de interesse.

Para o estudo, foram selecionadas imagens do satélite CBERS 4A na faixa temporal de janeiro de 2023 a dezembro de 2023. As imagens foram obtidas a partir do produto CBERS4A_WPM_L4_DN e processadas utilizando o software QGIS 3.16. Durante o processo de seleção, foram excluídas imagens que apresentavam efeitos atmosféricos adversos, a fim de minimizar impactos no processamento e assegurar a qualidade dos dados. As imagens selecionadas para análise foram aquelas adquiridas nas seguintes datas: 19 de maio de 2023, 19 de junho de 2023, 20 de julho de 2023 e 21 de outubro de 2023.

Após o download das imagens do satélite CBERS 4A através da plataforma do INPE, o software QGIS 3.16 foi utilizado para o processamento dos dados. Inicialmente, as bacias hidrográficas de São Tomaz e Rio Verdão foram delimitadas. Esta etapa foi realizada utilizando um mapa base disponibilizado pelo Sistema Estadual de Geoinformação de Goiás (SIEG), acessível em (<http://www.sieg.go.gov.br/siegdownloads/>).

A delimitação envolveu a extração das áreas de interesse, a conversão da camada para o formato *shapefile*, seguida pelo recorte e reprojeção ponto a ponto, assegurando que os

dados estivessem corretamente alinhados com as coordenadas geográficas e o sistema de referência desejado. Esta preparação inicial foi crucial para garantir a precisão dos estudos subsequentes. Com a área de estudo claramente definida, o tratamento das imagens envolveu várias etapas detalhadas. As imagens adquiridas foram empilhadas, combinando as diferentes bandas espectrais de cada data de captura para formar conjuntos completos de dados multiespectrais. As datas de obtenção das imagens selecionadas para o estudo foram 19 de maio de 2023, 19 de junho de 2023, 20 de julho de 2023 e 21 de outubro de 2023.

Esse empilhamento permitiu a análise temporal e espacial das condições da superfície terrestre ao longo do período de estudo. Em seguida, procedeu-se ao recorte das imagens para corresponder exatamente à área de estudo definida. As imagens recortadas foram salvas no formato TIFF, amplamente utilizado em análise de dados geoespaciais por sua capacidade de manter a qualidade das imagens e facilitar o processamento subsequente, incluindo o cálculo de índices específicos. Para aprimorar a resolução espacial das imagens, foi aplicada a técnica de *pansharpening*. Esta técnica envolve a fusão de uma imagem pancromática de alta resolução com imagens multiespectrais de menor resolução, resultando em imagens que combinam a riqueza de cores das bandas multiespectrais com a nitidez espacial da pancromática.

No caso deste estudo, foi selecionada uma banda de referência específica (0 da imagem *.tif*) para assegurar que a resolução dos pixels pós processamento fosse de 2 metros. Essa alta resolução permitiu uma análise mais detalhada das características da superfície. Na fase de renderização das bandas para visualização, adotou-se a combinação das bandas 4 (vermelho), 3 (verde) e 2 (azul), que são geralmente escolhidas para criar uma imagem colorida verdadeira (*true color*), facilitando a interpretação visual da área de estudo conforme ela aparece na realidade.

Com as imagens preparadas, aplicaram-se cálculos específicos utilizando a calculadora *raster* do QGIS. Essa ferramenta permitiu a aplicação de fórmulas e a realização de operações matemáticas sobre as bandas de imagem para gerar novos dados derivados, como o Índice de Estado Trófico (IET) e o Índice de Cobertura de Água (CA). Estes índices são fundamentais para a análise das condições ambientais e da qualidade da água na região estudada.

Por fim, para facilitar a interpretação dos resultados, as imagens processadas foram coloridas utilizando paletas de cores padrão. A utilização de escalas de cores apropriadas é essencial para destacar variações e padrões nas imagens, permitindo uma compreensão visual imediata dos dados e facilitando a identificação de áreas de interesse ou preocupação. Este

processo detalhado de tratamento e análise de imagens assegura que o estudo seja conduzido com alto rigor técnico, proporcionando resultados precisos e de alta qualidade para a avaliação das condições ambientais da bacia hidrográfica de São Tomaz e Rio Verdão.

3.4 Estimativa do índice trófico modificado

O índice de estado trófico (IET) foi desenvolvido por Carson (1977), sendo estimado com base nos dados de transparência (disco de secchi), concentração de minerais como fósforo e também do constituinte biológico como a clorofila A (CL-A). Esse índice é amplamente aplicado em estudos limnológicos, como também, como ferramenta de gestão de recursos hídricos. Atualmente, estudos têm sido desenvolvidos com objetivo de estimar o IET com dados orbitais a partir com estimativas de CL-A. Para essa proposta o IET foi estimado segundo a equação proposta por Lamparelli, 2004:

$$IET = 10 \times \left\{ 6 - \left[0,92 - 0,34 \times \left(\frac{\ln Cl_a}{\ln 2} \right) \right] \right\}$$

A clorofila A pode ser estimada utilizando a equação proposta por WANG *et al.* (2008), utilizando as bandas correspondentes ao espectro vermelho (Red) e ao verde (Green) do Landsat.

$$Cl_a = 20,115 \times \left[\frac{\left(\frac{Red}{Green} - 1 \right)}{\left(\frac{Red}{Green} + 1 \right)} \right] + 7,045$$

Para determinar os níveis de eutrofização foi proposto por LAMPARELLI (2004) as seguintes classificações:

Tabela 01 – Classificação do IET por estados tróficos.

| Estado Trófico | Faixa de Valores | Cor |
|-------------------|------------------|-----|
| Ultraoligotrófico | $IET \leq 47$ | |
| Oligotrófico | $47 \leq 52$ | |
| Mesotrófico | $52 \leq 59$ | |
| Eutrófico | $59 \leq 63$ | |

| | | |
|----------------|--------------|--|
| Supereutrófico | $63 \leq 67$ | |
| Hipereutrófico | $IET > 67$ | |

Fonte: Lamparelli, 2004

3.5 Análises estatísticas e elaboração dos mapas temáticos

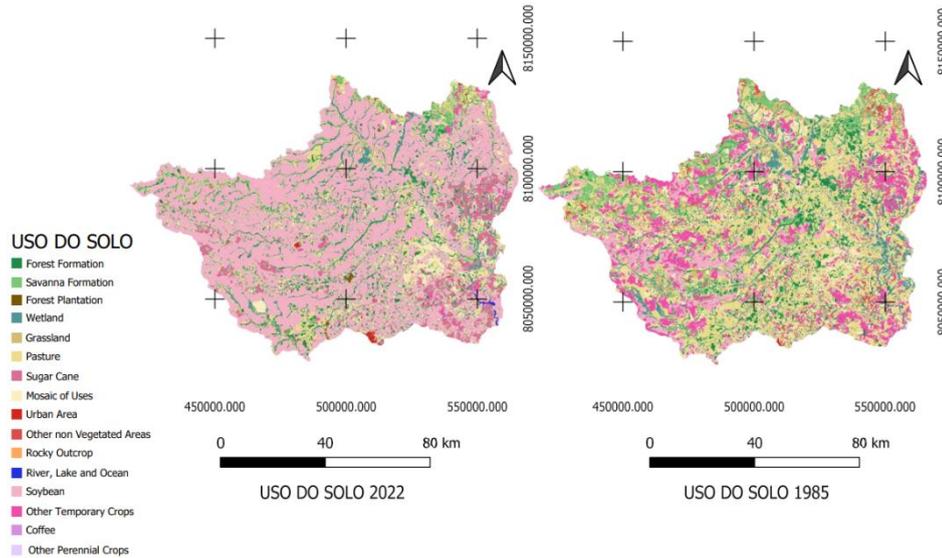
Para realizar as análises estatísticas e a elaboração dos mapas temáticos, foram comparados os dados de uso do solo dos anos de 1985 e 2020. Inicialmente, foram calculadas as porcentagens das diferentes classes de uso do solo para cada ano, permitindo uma avaliação quantitativa das mudanças ao longo do tempo. Essas análises incluíram o cálculo das diferenças percentuais entre os períodos, destacando as variações na cobertura e uso do solo. Além disso, foi avaliada a exponencialidade do uso do solo, analisando o ritmo de crescimento ou declínio das diferentes classes ao longo do período estudado. Essa abordagem permitiu identificar tendências de expansão ou retração em áreas específicas, fornecendo uma compreensão mais aprofundada dos processos de mudança de uso do solo.

Para a elaboração dos mapas temáticos, utilizou-se o software QGIS 3.16, tanto para o processamento dos dados quanto para a visualização dos resultados. Os mapas temáticos foram gerados a partir das análises de uso do solo, e cada classe foi representada com cores distintas para facilitar a interpretação visual das mudanças ocorridas entre 1985 e 2020. A análise visual dos mapas temáticos permitiu identificar padrões espaciais e tendências geográficas, complementando as análises quantitativas. Essa integração de dados estatísticos e visualização espacial proporcionou uma visão abrangente das transformações na paisagem ao longo do tempo, facilitando a identificação de áreas críticas e fornecendo uma base sólida para futuras decisões de planejamento e gestão ambiental.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise da figura 02 de uso do solo entre os anos de 1985 e 2022 revela mudanças significativas na cobertura do solo na área estudada. Observou-se uma expansão substancial da área destinada ao cultivo de soja, especialmente na porção central e oeste da região. Além disso, houve um crescimento considerável das áreas ocupadas por cana-de-açúcar, notadamente nas proximidades dos corpos d'água.

Figura 02 - Uso do solo 2020-1985



Fonte: VASCONCELOS, 2024

Paralelamente, registrou-se uma redução significativa nas áreas de formação florestal e savânica, indicando um desmatamento e conversão dessas áreas para uso agrícola e pastagens. As áreas de pastagem aumentaram substancialmente 1985: 279.917 hectares (28,90%) e 2022: Reduziu para 82.227 hectares (8,49%), substituindo a vegetação nativa.

Também foi observado um crescimento das áreas urbanas, particularmente próximas aos centros urbanos existentes figura 02. A presença de corpos d'água e áreas úmidas manteve-se relativamente estável, embora haja uma maior pressão sobre essas áreas devido à expansão agrícola.

Outros resultados importantes incluem um aumento na complexidade do uso do solo, com maior presença de mosaico de usos e uma diversificação das atividades agrícolas, além do aumento de áreas não vegetadas e outras culturas temporárias.

Tabela 02 – Relação de uso do solo para o ano de 1985 na bacia hidrográfica do São Tomaz

| Usos do Solo | Rótulos de Linha | Soma de área (m ²) | Hectáre | % de area |
|----------------------------|------------------|--------------------------------|-----------|-----------|
| Formação Florestal | 3 | 800.687.580 | 80.068,8 | 8,27 |
| Formação de Savana | 4 | 719.253.371 | 71.925,3 | 7,43 |
| Área Úmida | 11 | 685.729.515 | 68.573,0 | 7,08 |
| Pastagem | 12 | 402.462.581 | 40.246,3 | 4,16 |
| Pasto | 15 | 2.799.166.820 | 279.917,0 | 28,9 |
| Cana-de-açúcar | 20 | 23.633 | 2.363,3 | 0 |
| Mosaico de Usos | 21 | 1.744.174.557 | 174.417,0 | 18 |
| Área Urbana | 24 | 4.072.538 | 407.254,0 | 0,04 |
| Outras Áreas Não Vegetadas | 25 | 289.606.379 | 28.960,6 | 2,99 |

| | | | | |
|-----------------------------|----|----------------------|------------------|------------|
| Afloramento Rochoso | 29 | 1.856.056 | 185.606,0 | 0,02 |
| Rio, Lago e Oceano | 33 | 31.906.598 | 3.190,7 | 0,33 |
| Soja | 39 | 772.335.049 | 77.233,5 | 7,97 |
| Outras Culturas Temporárias | 41 | 1.433.734.044 | 143.373,0 | 14,8 |
| Café | 46 | 124.917 | 12.491,7 | 0 |
| Total Geral | | 9.685.133.638 | 968.513,0 | 100 |

Fonte: MAPBIOMAS

Referente a tabela 02 em 1985, a distribuição do uso do solo na bacia hidrográfica do São Tomaz revelou que a maior parte da área foi dedicada à pastagem, totalizando 2.799.166,820 hectares, o que corresponde a 28,90% da bacia. Este uso extensivo da terra reflete a predominância da pecuária na região, O segundo maior uso foi o mosaico de usos, termo referente as áreas de terra utilizadas para uma combinação de diferentes usos, em vez de um uso homogêneo como agricultura, pastagem, áreas urbanas e vegetação natural, criando um padrão diversificado de uso do solo, assim abrange 1.744.174,557 hectares, ou 18,01% da área total, indicando uma combinação de diferentes usos do solo, mostrando uma diversidade significativa na gestão da terra.

Culturas temporárias ocuparam 1.433.734,044 hectares, representando 14,80% da bacia. Este uso reflete a importância da agricultura de ciclo curto na região. A formação florestal cobria 80.068,800 hectares, o que equivale a 8,27% da área total. A formação de savana ocupava 71.925,300 hectares, ou 7,43%, indicando a presença significativa de vegetação herbácea ou arbustiva.

A soja era cultivada em 77.233,500 hectares, ou 7,97%, enquanto outras áreas não vegetadas totalizavam 28.960,600 hectares, correspondendo a 2,99% da bacia. A área urbana era bastante reduzida, com apenas 407,254 hectares, ou 0,04% já a cana-de-açúcar ocupava uma área mínima de 2.363,300 hectares, representando apenas 0,00024% da bacia. Áreas rochosas cobriam 1.856,056 hectares, ou 0,019%, e áreas de rios, lagos e oceanos somavam 31.906,598 hectares, ou 0,33%.

Tabela 03 – Relação de uso do solo para o ano de 2022 na bacia hidrográfica do São Tomaz

| Usos do Solo | Rótulos de linha | Soma de área (m ²) | Hectáres | % de área |
|---------------------|------------------|--------------------------------|-----------|-----------|
| Formação Florestal | 3 | 765.495.811 | 76.549,60 | 7,9 |
| Formação de Savana | 4 | 253.296.406 | 25.329,60 | 2,62 |
| Plantação Florestal | 9 | 30.028.681 | 3.002,87 | 0,31 |
| Área Úmida | 11 | 439.511.170 | 43.951,10 | 4,54 |

| | | | | |
|-----------------------------|----|----------------------|----------------|------------|
| Pastagem | 12 | 69.161.264 | 6.916,13 | 0,71 |
| Pasto | 15 | 822.267.564 | 82.226,80 | 8,49 |
| Cana-de-açúcar | 20 | 444.366.479 | 44.436,60 | 4,59 |
| Mosaico de Usos | 21 | 1.170.361.584 | 117.036 | 12,08 |
| Área Urbana | 24 | 17.877.807 | 1.787,78 | 0,18 |
| Outras Áreas Não Vegetadas | 25 | 47.855.695 | 4.785,57 | 0,49 |
| Afloramento Rochoso | 29 | 1.845.085 | 184,509 | 0,02 |
| Rio, Lago e Oceano | 33 | 29.607.487 | 2.960,75 | 0,31 |
| Soja | 39 | 5.372.524.116 | 537.252 | 55,47 |
| Outras Culturas Temporárias | 41 | 218.726.370 | 21.872,60 | 2,26 |
| Café | 46 | 2.112.647 | 211,265 | 0,02 |
| Outras Culturas Perpétuas | 48 | 97.908 | 9.790,80 | 0 |
| Total Geral | | 9.685.136.074 | 968.514 | 100 |

Fonte: MAPBIOMAS

Em 2022, a distribuição do uso do solo na bacia hidrográfica do São Tomaz apresentou mudanças significativas em relação a 1985 (Tabela 03), refletindo alterações na gestão da terra e na economia local. A soja tornou-se o uso dominante, abrangendo uma área de 5.372.524.116 hectares, ou 55,47% da bacia. Este aumento substancial em relação a 1985 indica uma expansão significativa da produção de soja, que agora ocupa a maior parte da área. A pastagem continuou a ser uma parte importante do uso do solo, com 822.267.564 hectares, correspondente a 8,49%, apesar de ainda significativa, a área dedicada à pastagem foi reduzida em comparação com o período anterior. O mosaico de usos cobre 1.170.361.584 hectares, ou 12,08%, demonstrando uma presença substancial de áreas com diferentes usos do solo, similar ao padrão observado em 1985.

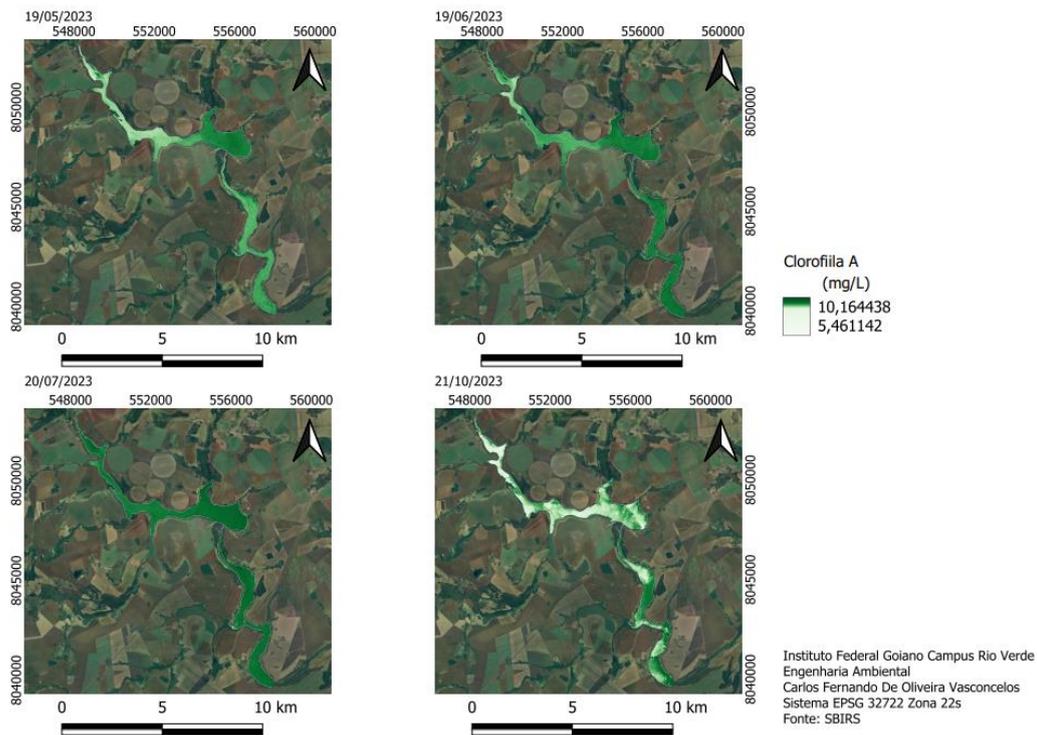
A formação florestal ocupa 76.549.511 hectares, o que equivale a 7,90% da bacia, embora tenha diminuído em comparação com 1985, a presença de florestas ainda é significativa. As áreas de savana foram reduzidas para 25.329.606 hectares, ou 2,62%, indicando uma diminuição na cobertura dessa vegetação. O plantio de floresta representa uma pequena parte da bacia, com 3.002.870 hectares, ou 0,31%, indicando uma expansão limitada de áreas reflorestadas ou florestas plantadas. Áreas úmidas ocupam 43.951.170 hectares, ou 4,54%, mantendo uma presença considerável, embora menor em comparação com 1985.

A cana-de-açúcar cobre 44.436.679 hectares, ou 4,59%, indicando uma importância moderada na produção agrícola da região. Áreas urbanas somam 1.787.778 hectares, ou

0,18%, o que representa um aumento significativo em relação a 1985, representando um crescimento na urbanização da bacia. Outras áreas não vegetadas totalizam 4.785.695 hectares, ou 0,49%, enquanto as áreas rochosas são 184.085 hectares, ou 0,02%. As áreas de rios, lagos e oceanos ocupam 2.960.487 hectares, ou 0,31%. Culturas temporárias têm uma área de 21.872.637 hectares, ou 2,26%, e o café cobre 2.112.647 hectares, ou 0,02%. Outras culturas perenes representam 97.908 hectares, ou 0,001%.

A análise da figura 03 representando a clorofila-a em diferentes datas revelaram variações significativas na concentração dessa substância ao longo do tempo. Em 19 de maio de 2023, as concentrações de clorofila-a variaram de 5,46 mg/L a 10,16 mg/L, com as maiores concentrações observadas principalmente ao longo dos corpos d'água nas regiões central e leste da área de estudo.

Figura 03 – Clorofila-A em mg/L.



Fonte: SBIRS

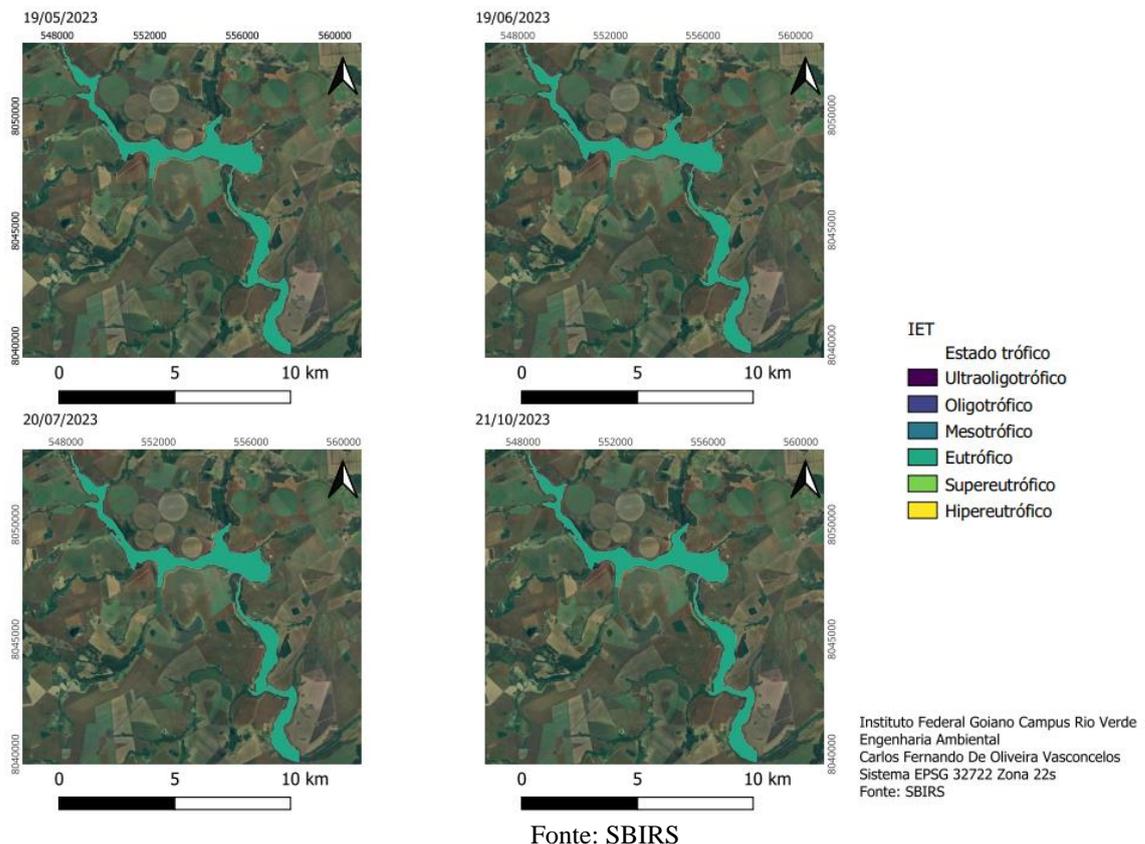
No dia 19 de junho de 2023, os valores de concentração de clorofila-a mantiveram-se dentro da mesma faixa de 5,46 mg/L a 10,16 mg/L, apresentando uma distribuição semelhante à do mês anterior. Essa constância sugere uma estabilidade nas condições ambientais que influenciam a proliferação de algas. Já em 20 de julho de 2023, observou-se um aumento nas áreas com alta concentração de clorofila-a, especialmente na região norte e

ao longo dos principais cursos d'água. Esse incremento pode ser atribuído a mudanças sazonais ou eventos de precipitação, que possivelmente contribuíram para uma maior proliferação de algas.

Por fim, em 21 de outubro de 2023, a concentração de clorofila-a continuou a variar entre 5,46 mg/L e 10,16 mg/L. No entanto, houve uma expansão significativa das áreas com alta concentração de clorofila-a, abrangendo uma maior extensão ao longo dos corpos d'água. Este aumento pode estar relacionado ao período de crescimento das algas, influenciado por fatores sazonais e ambientais.

Os estados tróficos dos corpos d'água descrevem a quantidade de nutrientes disponíveis e o impacto desses nutrientes na produtividade primária e na saúde ecológica do ambiente aquático. Entre esses estados, o estado eutrófico é caracterizado por uma abundância de nutrientes, particularmente fósforo e nitrogênio, que levam a uma alta produtividade primária. Isso se reflete em uma série de indicadores visuais e ambientais. A análise da figura 04 é demonstrada de forma mais simples na qual apresenta o único estado trófico do rio estudado (ANDRIETTI, 2016).

Figura 04 – Índice de Estado Trófico.



A análise de uso do solo na bacia hidrográfica do Rio Verdão revela um padrão crescente de conversão de áreas naturais para o cultivo de soja, revelando tendências observadas em outras regiões agrícolas do Brasil. Essa transformação intensiva da paisagem está associada a uma série de consequências ambientais, destacando-se, principalmente, os impactos sobre a qualidade da água e os processos ecológicos dos corpos d'água locais.

A expansão do cultivo de soja na bacia do Rio Verdão tem levado à supressão de florestas nativas e outros ecossistemas naturais. Esse desmatamento reduz a biodiversidade local, elimina habitats de espécies endêmicas e afeta o regime hídrico da região, incluindo a disponibilidade de água e os processos de evapotranspiração. A remoção da cobertura vegetal natural também aumenta a vulnerabilidade do solo à erosão, facilitando o transporte de sedimentos para os corpos hídricos. Esses fatores resultam em uma modificação significativa do uso da terra, conforme evidenciado nas tabelas 02 e 03.

A avaliação do nível trófico dos corpos d'água revelou que as áreas próximas às barragens hidrelétricas apresentam elevados índices de eutrofização. Esse processo consiste no enriquecimento de nutrientes, sobretudo nitrogênio e fósforo, resultando em um crescimento descontrolado de algas e vegetação aquática. Esse fenômeno pode resultar em degradação da qualidade da água, redução da diversidade biológica e até mesmo na proliferação de algas tóxicas. A ampliação da produção de soja contribui de diversas formas para a eutrofização dos corpos d'água. A utilização intensiva de fertilizantes nitrogenados e fosfatados na agricultura pode resultar no escoamento desses nutrientes para rios e lagos, promovendo o crescimento excessivo de algas.

A conversão de terras para a agricultura de soja frequentemente envolve práticas de manejo do solo que exacerbam a erosão. A perda de cobertura vegetal, combinada com práticas agrícolas inadequadas, resulta na mobilização de grandes quantidades de sedimentos que são transportados para os corpos d'água. Esse aumento na carga de sedimentos pode alterar a morfologia dos cursos d'água, reduzir a capacidade de armazenamento de reservatórios e barragens e impactar negativamente a qualidade da água, tornando-a mais turva e menos adequada para consumo e atividades recreativas.

Esses achados ressaltam a urgente necessidade de adotar práticas agrícolas mais sustentáveis na região, com o objetivo de minimizar os impactos negativos da produção de soja sobre o estado trófico dos corpos d'água. Ações como o manejo adequado de fertilizantes, preservação de áreas naturais e implementação de técnicas de agricultura conservacionista podem contribuir para a redução da eutrofização e preservar a qualidade da

água em ecossistemas aquáticos vulneráveis.

A aplicação precisa de fertilizantes, com base em análises detalhadas do solo, pode minimizar o escoamento de nutrientes para os corpos d'água. Práticas como a rotação de culturas e o uso de culturas de cobertura também podem ajudar a manter a fertilidade do solo e reduzir a necessidade de fertilizantes químicos.

A manutenção de faixas de vegetação nativa ao longo dos cursos d'água pode atuar como uma barreira natural, reduzindo o escoamento de sedimentos e nutrientes para os rios e lagos. Essas áreas de preservação permanente (APPs) são essenciais para a proteção dos recursos hídricos e da biodiversidade local.

A implementação de técnicas de agricultura conservacionista, como o plantio direto e a integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), pode melhorar a estrutura do solo e reduzir a erosão. Essas práticas promovem a sustentabilidade agrícola e contribuem para a mitigação dos impactos ambientais associados à produção de soja.

A utilização de imagens de satélite para aplicar fórmulas que permitam uma constatação clara sobre a interação entre o uso do solo e o estado trófico da área de estudo. Essa abordagem visa averiguar a relação entre a expansão do uso do solo e os processos de eutrofização observados. Com a adoção de práticas agrícolas mais sustentáveis, espera-se mitigar os impactos negativos sobre os corpos d'água e promover a conservação dos ecossistemas aquáticos na bacia hidrográfica do Rio Verde.

5 CONCLUSÃO

Com base na pesquisa realizada a viabilidade do uso de técnicas de sensoriamento remoto para o monitoramento do estado trófico dos corpos hídricos, com foco nas bacias hidrográficas do Rio Verdão e dos Bois. A análise espacial e temporal do uso e ocupação do solo revelou uma significativa transformação na paisagem, especialmente a conversão de áreas naturais em áreas agrícolas, com destaque para a expansão da cultura de soja. Essa mudança no uso da terra tem implicações diretas sobre a qualidade da água e o estado trófico dos rios, evidenciado pelo aumento da concentração de clorofila-a e pela elevação dos índices de eutrofização em determinadas regiões.

A aplicação do Índice de Estado Trófico (IET) adaptado para dados de sensoriamento remoto mostrou-se uma ferramenta eficaz para identificar áreas com potencial de degradação ambiental. No entanto, os resultados também apontam para a necessidade de

complementação com monitoramento *in loco*, a fim de validar e aprimorar as estimativas feitas a partir das imagens de satélite.

Além disso, o estudo ressalta a urgência de implementar práticas agrícolas mais sustentáveis na região, visando mitigar os impactos negativos sobre os corpos d'água. Medidas como o manejo adequado de fertilizantes, a preservação de áreas de vegetação nativa e a adoção de técnicas conservacionistas podem contribuir significativamente para a preservação da qualidade da água e a sustentabilidade dos recursos naturais.

Conclui-se que o sensoriamento remoto é uma ferramenta poderosa para o monitoramento ambiental em larga escala, mas deve ser integrado a práticas locais de gestão e conservação para garantir a eficácia na mitigação dos impactos ambientais. A continuidade e o aprimoramento dessas práticas são essenciais para a proteção dos recursos hídricos e para o desenvolvimento sustentável das bacias hidrográficas estudadas.

REFERÊNCIAS

ALVES, W. S.; SCOPEL, I.; MARTINS, A. P.; MORAIS, W. A. **Análise morfométrica da bacia do Ribeirão das Abóboras – Rio Verde (GO)**. Geociências, v. 35, n. 4, p. 568-584, 2016.

ALVES, W. S.; SANTOS, L. N. S.; MEDEIROS, V. S.; AQUINO, D. S.; MORAIS, W. A.; SALEH, PEREIRA, V. C.; MOURA, D. M. B. **Avaliação da qualidade da água e estado trófico do Ribeirão das Abóboras, em Rio Verde – GO, Brasil**. Geociências, v. 36, n. 1, p. 13-29, 2017.

ALVES, W. S.; SANTOS, BALBINO, M. A. P.; MARTINS, A. P.; SCOPEL, I.; SILVA, H. T. F. **Qualidade e estado trófico da água na alta bacia hidrográfica do Ribeirão da Laje, em Rio Verde (GO)**. In: III Fórum Regional das Águas e XX Encontro de Geografia da UEG, 2018, p. 295-306.

ALVES, W. S.; MORAIS, W. A.; MARTINS, A. P.; AQUINO, D. S.; PEREIRA, M. A. B.; SALEH, B. B. **Análise do uso da terra, da cobertura vegetal e da morfometria da bacia do Ribeirão Douradinho, no sudoeste de Goiás, Brasil**. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 12, n. 3, p. 1093-1113, 2019.

ANA – Agência Nacional de Águas. (2020). **Política Nacional de Recursos Hídricos e o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos**. Brasília: ANA. Disponível em: www.ana.gov.br.

ANDRIETTI, Grasiene et al. **Índices de qualidade da água e de estado trófico do rio Caiabi, MT**. Revista Ambiente & Água, v. 11, p. 162-175, 2016.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 9 de janeiro de 1997. Institui a política nacional de recursos hídricos, cria o sistema nacional de gerenciamento de recursos hídricos, regulamenta o inciso xix do art. 21 da constituição federal, e altera o art. 1º da lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Da política nacional de recursos hídricos**, [S. l.], 16 set. 2024. Disponível em: <https://legislacao.presidencia.gov.br/atos/?tipo=LEI&numero=9433&ano=1997&ato=a12ATVU90MJpWTbaf>. Acesso em: 16 set. 2024.

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a medida provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. **Institui o novo código florestal brasileiro.**, [S. l.], 16 set. 2024. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/112651.htm?itid=lk_inline_enhanced-template. Acesso em: 16 set. 2024.

CARSON, R. E. **A trophic state index for lakes**. *Limnology and Oceanography*, v. 22, n. 1, p. 9, 1977.

CARLSON, R. E. (1977). **A Trophic State Index for Lakes**. *Limnology and Oceanography*, 22(2), 361-369.

CASSMAN, K. G., WOOD, S., CHOO, P. S., COOPER, H. D., DEVENDRA, C., DIXON, J., GASKELL, J., KHAN, S., LAL, R., LIPPER, L., PRETTY, J., PRIMAVERA, J., RAMANKUTTY, N., VIGLIZZO, E., KADUNGURE, S., KANBAR, N., KHAN, Z., LEAKEY, R., PORTER, S., AND THARME, R. (2005) **Cultivated Systems**. Ecosystems and human well-being: current state and trends, Island Press, Washington DC, 745-794 p.

COLDITZ, R. **An evaluation of different training sample allocation schemes for discrete and continuous land cover classification using decision tree-based algorithms**. *Remote Sensing*, v. 7, n. 8, p. 9655-9681, 2015.

COSTA, A. R. S.; ARAGÃO, R. M.; SOUSA JUNIOR, P. M.; ALVES, M. H. D.; GONÇALVES, A. C. S.; TEIXEIRA, O. M. M.; MONTEIRO, G. C.; FAIAL, K. C. F. **Impacto da urbanização nas águas superficiais de uma microbacia urbana no município de Capanema/PA, Brasil**. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v. 12, n. 2, p. 203-215, 2021.

CUNHA, D. G. F., CALIJURI, M. C., & LAMPARELLI, M. C. (2013). **Avaliação do Estado Trófico de Reservatórios Tropicais**. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 18(3), 243-257.

ESTEVES, F. A. (2011). **Fundamentos de Limnologia**. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência.

FLÜGGE, U. I.; FREISL, M.; HELDT, H. W. **Balance between metabolite accumulation and transport in relation to photosynthesis by isolated spinach chloroplasts**. *Plant Physiology*, v. 65, n. 4, p. 574-577, 1980.

GARCIA, A. V.; OLIVEIRA, E. C. A.; SILVA, G. P.; COSTA, P. P.; OLIVEIRA, L. A. **Disponibilidade hídrica e volume de água outorgado na microbacia do Ribeirão das Abóboras, município de Rio Verde, estado de Goiás.** Caminhos de Geografia, v. 8, n. 22, p. 97-106, 2007.

HENRY, R. (2003). **Ecologia de reservatórios: estrutura, função e aspectos sociais.** São Carlos: Rima Editora.

HU, M.; ZHANG, Y.; MA, R.; XUE, K.; CAO, Z.; CHU, Q.; JING, Y. **Optimized remote sensing estimation of the lake algal biomass by considering the vertically heterogeneous chlorophyll distribution: Study case in Lake Chaohu of China.** Science of the Total Environment, v. 771, 2021a.

HU, M.; MA, R.; CAO, Z.; XIONG, J.; XUE, K. **Remote estimation of trophic state index for inland waters using Landsat-8 OLI imagery.** Remote Sensing, v. 13, 2021.

HUERTA SOBALVARRO, K. K.; MARTÍNEZ CENTENO, A. L. **La Revolución Verde.** Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático v. 4, n. 8, p. 1040-1044, 2018.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Monitoramento da Cobertura e Uso da Terra do Brasil.** Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/informacoes-ambientais/15831-cobertura-e-uso-da-terra-do-brasil.html?=&t=sobre>. Acesso em: 1 set. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Manual técnico de uso da terra.** Rio de Janeiro, 2013. 171 p.

JØRGENSEN, S. E., KUMAR, S., & HALCROW, S. (2014). **Management of Eutrophication.** Water Research, 57(1), 203-216.

LAMPARELLI, M. C. **Grau de trofia em corpos d'água do Estado de São Paulo: Avaliação dos métodos de monitoramento.** 2004. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

LAMPARELLI, M. C. (2004). **Graus de trofia em corpos d'água do estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento.** São Paulo: CETESB.

LIANG, Q.; ZHANG, Y.; MA, R.; LOISELLE, S.; LI, J.; HU, M. **A MODIS-based novel method to distinguish surface cyanobacterial scums and aquatic macrophytes in Lake Taihu.** Remote Sensing, v. 9, n. 133, 2017.

MACHADO, M. T. S.; BAPTISTA, G. M. M. **Sensoriamento remoto como ferramenta de monitoramento da qualidade da água do Lago Paranoá (DF).** Revista Engenharia Sanitária, v. 21, n. 2, p. 357-365, 2016.

MANTELLI, Luiz Rogério. **Sensoriamento remoto como ferramenta para gestão de recursos hídricos: modelagem espaço-temporal dos riscos ecológicos em bacias**

hidrográficas. 2012. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

MAPBIOMAS. Projeto Mapbiomas. Algorithm Theoretical basis document (ATBD). **MapBiomás General “Handbook”**. Collection 7, v.1, 2022.

MATSUMURA-TUNDISI, T., & TUNDISI, J. G. (2017). **Impacto da eutrofização e tecnologias de recuperação de lagos e reservatórios.** Revista Brasileira de Biologia, 77(3), 580-590.

MATTIUZI, C. D. P.; MARQUES, J. **Gestão integrada dos recursos hídricos: avaliação dos benefícios do uso conjunto de águas superficiais e subterrâneas em uma região no sul do Brasil.** Águas Subterrâneas, v. 33, n. 4, p. 340-353, 2019.

MORENO, A. L.; KUSDRA, J. F.; PICAZEVICZ, A. A. C. **Crescimento do milho em resposta a *Azospirillum brasilense* e nitrogênio.** Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, v. 10, n. 5, p. 293, ago./set. 2019.

NOSZCZYK, T. **A review of approaches to land use changes modeling.** Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, v. 25, n. 6, p. 1377-1405, 2019.

OTUKEI, J. R.; BLASCHKE, T. **Land cover change assessment using decision trees, support vector machines and maximum likelihood classification algorithms.** International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, v. 12, p. S27–S31, 2010.

PEREIRA, B. W. F. et al. **Uso da terra e degradação na qualidade da água na bacia hidrográfica do rio Peixe-Boi, PA, Brasil.** Ambiente e Água, Para, v. 11, n. 2, p. 473-485, abr. 2016.

PORCIUNCULA, D. C. L.; GONÇALVES, M. V. P.; ALENCAR, C. M. M. **Indicador qualitativo de tensões no uso das águas em identidades territoriais de vida rural e urbana: evidências empíricas na Região Metropolitana de Salvador, Bahia (Brasil).** Desenvolvimento e Meio Ambiente, v. 58, p. 105-125, jul./dez. 2021.

REBOUÇAS, Aldo C. **Água no Brasil: abundância, desperdício e escassez. Bahia análise & dados,** v. 13, n. esp., p. 341-345, 2003.

ROGAN, J.; CHEN, D. **Remote sensing technology for mapping and monitoring land-cover and land-use change.** Progress in Planning, v. 61, p. 301–325, 2004.

SANTOS, G. B. et al. **Identificação e classificação de impactos ambientais por meio de inventário participativo de atividades na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Abóboras, Rio Verde – GO.** Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 21, n. 2, p. 381-389, abr./jun. 2016.

SANTOS, M. et al. **Dinâmica espaço-temporal do uso e ocupação do solo em bacias hidrográficas na Amazônia Maranhense**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 20, n. 7, p. 668-673, jul. 2016.

SALAS, H. J., & MARTÍNEZ, R. M. (2014). **Controlling eutrophication: An evaluation of alternatives**. Ecological Modelling, 4(1), 85-93.

SHARMA, R.; GHOSH, A.; JOSHI, P. K. **Spatio-temporal footprints of urbanisation in Surat, the Diamond City of India (1990–2009)**. Environmental Monitoring and Assessment, v.185, p.3313-3325, 2013.

SHEELA, A. M.; LETHA, J.; JOSEPH, S.; RAMACHANDRAN, K. K.; SANALKUMAR, S.P. **Trophic state index of a lake system using IRS (P6-LISS III) satellite imagery**. Environmental Monitoring and Assessment, v. 177, n. 1-4, p. 575-592, 2011.

SHI, K.; ZHANG, Y.; SONG, K.; LIU, M.; ZHOU, Y.;ZHANG, Y. **A semi-analytical approach for remote sensing of trophic state in inland waters: Bio-optical mechanism and application**. Remote Sensing of Environment, v. 232, 2019.

SINGH, A. **Digital change detection techniques using remotely-sensed data**. International Journal of Remote Sensing, v. 10, n. 6, p. 989- 1003, 1989.

SILVA, A. A. B. et al. **Uso do sensoriamento remoto no monitoramento do uso e ocupação do solo em áreas de preservação permanente no rio Uberabinha (MG)**. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 12, n. 3, p. 1093-1113, 2019.

SILVA, A. P. S. et al. **Metodologia espaço-temporal aplicada ao mapeamento de paisagens em fazendas de gado de corte no Pantanal**. 2016.

SILVA, E. R.; DELGADO, R. C.; SOUZA, L. P. S.; SILVA, I. S. **Caracterização física em duas bacias hidrográficas do Alto Juruá, Acre**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 18, n. 7, p. 714-719, 2014.

SILVA, M. A., & BARBOSA, F. A. R. (2013). **Eutrofização e Gestão de Recursos Hídricos**. Ecologia e Conservação dos Ecossistemas Aquáticos, 15(2), 77-89.

SOUZA, M. B. **Mudanças na cobertura do uso da terra na bacia hidrográfica do Ribeirão Abóboras (GO)**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Universidade de Rio Verde, Rio Verde, GO.

STUMPF, R. P.; TOMLINSON, M. C.; KROENKE, A. E.; USHAH, A. A.; LOMAS, M. W.; DORL, J. **Remote sensing of algae in the USA: Lessons learned for management and monitoring of large lakes and coastal regions**. Remote Sensing, v. 11, 2019.

TALUKDAR. S.; SINGHA. P.; MAHATO. S.; SHAHFAHAD; PAL. S.; LIOU Y.; RAHMAN. **Land-Use A. Land-Cover Classification by Machine Learning Classifiers for Satellite Observations—A Review**. Remote Sensing , V. 12, 2020.

TOMINAGA, L. K.; DOS SANTOS, J. C. T.; RIBEIRO, F. V.; ANTUNES, I. A. C.; COIMBRA, R. G. **Efeitos do uso da terra no regime hídrico da bacia hidrográfica do rio Formoso, sudoeste de Goiás.** Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 26, n. 2, p. 297-306, 2021.

TUNDISI, J. G., & MATSUMURA-TUNDISI, T. (2008). **Limnologia e manejo de reservatórios no Brasil.** Ecosistemas, 17(2), 80-94.

VELÁZQUEZ-ROA, J. et al. **Efectos del cambio climático sobre los flujos hidrológicos en una microcuenca andina del Valle del Mantaro, Perú.** Revista Ambiente & Agua, v. 11, n. 4, p. 835-849, 2016.

WAGNER, T.; YIP, H. Y.; MURPHY, T. P. **Remote sensing of phosphorus concentrations in the Great Lakes: Satellite-derived estimates and algorithm improvements.** Remote Sensing of Environment, v. 160, p. 78-89, 2015.

WANG, J.; HAN, L.; DU, G. S. **Use of satellite imagery to assess the trophic state of Miyun Reservoir, Beijing, China.** Environmental Pollution, v. 155, n.1, p. 13-19, 2008.

WU, Z.; LIU, Y.; WANG, H.; ZHANG, J.; YIN, Y.; LIU, C.; LI, H.; ZHANG, Q.; ZHANG, L. **Long-term changes in the chlorophyll-a concentration and water transparency in large shallow eutrophic Lake Taihu, China.** Hydrobiologia, v. 817, p. 283-292, 2018.

YANG, C.; WU, G.; DING, K.; SHI, T.; LI, Q.; WANG, J. **Improving land use/land cover classification by integrating pixel unmixing and decision tree methods.** Remote Sensing. v. 9, 2017.