

**INSTITUTO FEDERAL GOIANO DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA GOIANO - CAMPUS RIO VERDE
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA APLICADA E
SUSTENTABILIDADE**

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE FLORESTA NATIVA E
FLORESTA PLANTADA DE PINUS: ESTUDO EM MICROBACIAS
EXPERIMENTAIS NO PARANÁ**

**Orientador: Dr. Lucas Peres Angelini
Discente: Maria Antonia Balbino Pereira**

**RIO VERDE - GO
MAIO - 2025**

MARIA ANTONIA BALBINO PEREIRA

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE FLORESTA NATIVA E
FLORESTA PLANTADA DE PINUS: ESTUDO EM MICROBACIAS
EXPERIMENTAIS NO PARANÁ**

Dissertação apresentada à banca examinadora como parte das exigências para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA APLICADA E SUSTENTABILIDADE, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde – Área de concentração Engenharia Aplicada e Sustentabilidade.

Orientador: Dr. Lucas Peres Angelini

RIO VERDE - GO

MAIO - 2025

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF Goiano - SIBi**

P436a Pereira, Maria Antonia Balbino
ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE FLORESTA NATIVA E
FLORESTA PLANTADA DE PINUS: ESTUDO EM
MICROBACIAS EXPERIMENTAIS NO PARANÁ / Maria
Antonia Balbino Pereira. Rio Verde 2025.

61f. il.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Peres Angelini.
Dissertação (Mestre) - Instituto Federal Goiano, curso de
0233144 - Mestrado Profissional em Engenharia Aplicada e
Sustentabilidade (Campus Rio Verde).

1. IET. 2. Qualidade da água. 3. Floresta plantada. I. Título.

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, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

<input type="checkbox"/> Tese (doutorado)	<input type="checkbox"/> Artigo científico
<input checked="" type="checkbox"/> Dissertação (mestrado)	<input type="checkbox"/> Capítulo de livro
<input type="checkbox"/> Monografia (especialização)	<input type="checkbox"/> Livro
<input type="checkbox"/> TCC (graduação)	<input type="checkbox"/> Trabalho apresentado em evento
<input type="checkbox"/> Produto técnico e educacional - Tipo:	<input type="text"/>
Nome completo do autor:	Matrícula:
<input type="text" value="Maria Antonia Balbino Pereira"/>	<input type="text" value="2023102331440007"/>
Título do trabalho:	<input type="text" value="Análise comparativa entre floresta nativa e floresta plantada de pinus: estudo em microbacias experimentais no Paraná"/>

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

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 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;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autoria, 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;
- Que 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.

Documento assinado digitalmente
 **MARIA ANTONIA BALBINO PEREIRA**
Data: 21/08/2025 15:59:21-0300
Verifique em <https://validar.ifg.gov.br>

/ /
Local Data

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

 Documento assinado digitalmente
LUCAS PERES ANGELINI
Data: 22/08/2025 14:26:37-0300
Verifique em <https://validar.ifg.gov.br>

Assinatura do(a) orientador(a)



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

Ata nº 42/2025 - SREPG/CMPR/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Unidade do IF Goiano:	Campus Rio Verde	
Programa de Pós-Graduação:	Engenharia Aplicada e Sustentabilidade	
Defesa de:	Dissertação	Defesa de número: 86
Data: 26/05/2025	Hora de início: 14:00h	Hora de encerramento: 18:00h
Matrícula do discente:	2023102331440007	
Nome do discente:	Maria Antônia Balbino Pereira	
Título do trabalho:	ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE FLORESTA NATIVA E FLORESTA PLANTADA DE PINUS: ESTUDO EM MICROBACIAS EXPERIMENTAIS NO PARANÁ	
Orientador:	Lucas Peres Angelini	
Área de concentração:	Engenharia Aplicada e Sustentabilidade	
Linha de Pesquisa:	Eficiência Energética e Sustentabilidade	
Projeto de pesquisa de vinculação	ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE FLORESTA NATIVA E FLORESTA PLANTADA DE PINUS: ESTUDO EM MICROBACIAS EXPERIMENTAIS NO PARANÁ	
Titulação:	Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade	

Nesta data, reuniram-se os componentes da Banca Examinadora, Prof. Dr. Lucas Peres Angelini (Presidente da banca), Prof. Dr. Bruno Botelho Saleh (Avaliador Interno) e Prof^ª. Dra. Maria José Brito Zakia (Avaliadora Externa) sob a presidência do primeiro, em sessão pública realizada de forma online, para procederem a avaliação da defesa de dissertação, em nível de Mestrado, de autoria de **MARIA ANTÔNIA BALBINO PEREIRA**, discente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade do Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde. A sessão foi aberta pelo presidente da Banca Examinadora, Lucas Peres Angelini, que fez a apresentação formal dos membros da Banca. A palavra, a seguir, foi concedida o(a) autor (a) da dissertação para, em 40 min., proceder à apresentação de seu trabalho. Terminada a apresentação, cada membro da banca arguiu o(a) examinado(a), tendo-se adotado o sistema de diálogo sequencial. Terminada a fase de arguição, procedeu-se a avaliação da defesa. Tendo-se em vista as normas que regulamentam o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, e procedidas às correções recomendadas, a dissertação foi APROVADA, considerando-se integralmente cumprido este requisito para fins de obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA APLICADA E SUSTENTABILIDADE**. A conclusão do curso dar-se-á quando da entrega na secretaria do PPGEAS da versão definitiva da dissertação, com as devidas correções. Assim sendo, esta ata perderá a validade se não cumprida essa condição, em até **60** (sessenta) dias da sua ocorrência. A Banca Examinadora recomendou a publicação dos artigos científicos oriundos dessa Tese em periódicos de circulação nacional e/ou internacional, após procedida as modificações sugeridas. Cumpridas as formalidades da pauta, a presidência da mesa encerrou esta sessão de defesa de dissertação de mestrado, e foi lavrada a presente Ata, que, após lida e achada conforme, será assinada pelos membros da Banca Examinadora.

Decisão da banca: Aprovada

Esta defesa é parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna do IFGoiano.

Documento assinado eletronicamente por:

- **Lucas Peres Angelini, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 26/05/2025 19:43:53.
- **Bruno Botelho Saleh, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 02/06/2025 14:53:41.
- **Maria Jose Brito Zakia, 029.259.998-67 - Usuário Externo**, em 11/06/2025 20:20:28.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 12/05/2025. 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: 705255
Código de Autenticação: d8f51c911c



AGRADECIMENTOS

A Deus, por estar comigo todos os dias, me fazendo companhia, me fortalecendo e guiando para uma vida melhor. À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG) e ao Centro de Excelência em Agricultura Exponencial (CEAGRE), pelo apoio financeiro concedido por meio da bolsa de mestrado e pela oportunidade de realizar meu sonho. Ao meu orientador, Prof. Dr. Lucas, cuja orientação, paciência e estímulo foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. À professora Zeze, pelas dicas importantíssimas, e à Samantha Nazare, por ter dado início ao projeto.

BIOGRAFIA DO AUTOR

Maria Antonia Balbino Pereira, nascida em 10 de agosto de 1999 na cidade de Goiana, Goiás. Graduada em Engenharia Ambiental em 2022, pelo Instituto Federal Goiano de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano - Campus Rio Verde. E, em 2023 ingressou no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade na linha de pesquisa “Eficiência Energética e Sustentabilidade”.

RESUMO

Cada tipo de uso e cobertura da terra influencia o meio ambiente de maneiras diferentes, entender os impactos das ações/alterações humanas nos diferentes usos é fundamental para conservação. Assim, essa pesquisa teve como objetivo analisar se a qualidade da água é afetada pela substituição de vegetação nativa por plantada. O estudo foi realizado em duas microbacias, uma de floresta nativa e uma de floresta plantada em mosaico, em Telêmaco Borba (PR), município referência em representatividade de florestas plantadas no Brasil. Para entender as modificações na qualidade da água foi utilizado o índice de estado trófico (IET) considerando o fósforo total. Além disso, como complemento foram analisados os parâmetros de precipitação, vazão, nitrato e fósforo total. As coletas de dados foram realizadas de 2004 a 2024, pelo Programa Cooperativo sobre Monitoramento e Modelagem de Bacias Hidrográficas, que conduz pesquisas em colaboração com a empresa responsável pela área e o Laboratório de Hidrologia Florestal da ESALQ/USP. Os valores de nitrato na microbacia plantada superaram os da microbacia nativa em anos com eventos extremos de precipitação (2009, 2015) e no período chuvoso de 2023. Para o fósforo, nos anos em que houve diferença significativa, os valores da microbacia nativa foram mais elevados. No entanto, em 2004 (0,075 mg/L), 2008 (0,043 mg/L) e 2022 (0,048 mg/L), a microbacia de floresta plantada apresentou médias superiores, coincidindo com anos de vazões abaixo da média, uma relação explicada pela correlação negativa entre fósforo e vazão. Quanto ao IET, ambas as microbacias apresentaram comportamento semelhante, com classificação variando entre ultraoligotrófico e mesotrófico. Ainda assim, com exceção de 2004, os valores médios da microbacia nativa foram superiores na maioria dos anos. Tanto para fósforo como para IET, essa diferença pode estar relacionada com a maior proporção de silte na microbacia nativa, que influencia a retenção e disponibilidade de nutrientes no sistema aquático. O estudo também evidenciou que, para todos os parâmetros analisados, os anos durante e após o manejo florestal não apresentaram aumentos substanciais, indicando que mudanças no uso e cobertura da terra não comprometeram diretamente a qualidade da água. Adicionalmente, por meio da aplicação do NDVI, foi possível identificar o tempo necessário para que a cobertura vegetal retornasse às condições anteriores ao manejo, demonstrando a resiliência da vegetação plantada na recuperação do dossel. Esses resultados contribuem para uma compreensão mais aprofundada dos efeitos das diferentes coberturas vegetais e práticas de manejo em mosaico no monitoramento ambiental e na gestão da qualidade da água em microbacias hidrográficas.

Palavras-chave: IET, Qualidade da água, Floresta Plantada.

ABSTRACT

Each type of land use and cover influences the environment in different ways; understanding the impacts of human actions/changes on different uses is crucial for conservation. Therefore, this research aimed to analyze whether water quality is affected by the replacement of native vegetation with planted vegetation. The study was conducted in two micro-basins, one with native forest and one with planted forest, in Telêmaco Borba, Paraná, a municipality which is a benchmark for the representation of planted forests in Brazil. To understand the changes in water quality, the trophic state index (TSI) was used, considering total phosphorus. Additionally, precipitation, flow, nitrate, and total phosphorus parameters were analyzed. Data collection was conducted from 2004 to 2024 by the Cooperative Program on Monitoring and Modeling of Watersheds, which conducts research in collaboration with the company responsible for the area and the Forest Hydrology Laboratory at ESALQ/USP. Nitrate values in the planted watershed exceeded those in the native watershed in years with extreme precipitation events (2009, 2015) and in the 2023 rainy season. For phosphorus, in the years where there was a significant difference, the values in the native watershed were higher. However, in 2004 (0.075 mg/L), 2008 (0.043 mg/L), and 2022 (0.048 mg/L), the planted forest watershed presented higher averages, coinciding with years of below-average flows, a relationship explained by the negative correlation between phosphorus and flow. Regarding the TSI, both watersheds presented similar behavior, with classification ranging from ultraoligotrophic to mesotrophic. Even so, except for 2004, the average values in the native watershed were higher in most years. For both phosphorus and TSI, this difference may be related to the higher proportion of silt in the native watershed, which influences nutrient retention and availability in the aquatic system. The study also showed that, for all parameters analyzed, the years during and after forest management did not show substantial increases, indicating that changes in land use and land cover did not directly compromise water quality. Additionally, through the application of NDVI, it was possible to identify the time required for vegetation cover to return to pre-management conditions, demonstrating the resilience of planted vegetation in canopy recovery. These results contribute to a deeper understanding of the effects of different vegetation covers and mosaic management practices on environmental monitoring and water quality management in watersheds.

Keywords: IET, Water quality, Planted forest.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO GERAL	1
1.1	Justificativa	2
1.2	Revisão de Literatura	3
1.2.1	Bacia hidrográfica	3
1.2.2	Teoria do rio contínuo.....	3
1.2.3	Uso e cobertura da terra	4
1.2.3	Florestas plantadas	5
1.2.4	Florestas plantadas em mosaico.....	6
1.2.5	Setor Florestal	6
1.2.6	Índice de estado trófico	8
1.2.7	Fósforo e nitrato	10
1.2.8	Geoprocessamento aplicado à gestão hídrica.....	11
2.	OBJETIVOS	12
2.1	Objetivo geral.....	12
2.2	Objetivos específicos	12
3.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	13
4.	CAPÍTULO 1 – ARTIGO 1	18
4.1	Introdução	21
4.2	Material e Métodos	23
4.2.1	Área de estudo.....	23
4.2.2	Manejo Florestal	28
4.2.3	Aquisição de bases de dado	30
4.2.4	Procedimentos metodológicos	32
4.2.5	Análises estatísticas.....	32
4.2.6	Índice espectral para análise no uso e cobertura da terra.....	33

4.3	Resultados	34
4.3.1	<i>Análise espaço-temporal da precipitação nas microbacias hidrográficas.....</i>	34
4.3.2	<i>Análise espaço-temporal da vazão nas microbacias hidrográficas ..</i>	36
4.3.3	<i>Análise espaço-temporal da concentração de nitrato e fósforo nas microbacias hidrográficas</i>	39
4.3.4	<i>Análise espaço-temporal do IET nas microbacias hidrográficas.....</i>	41
4.3.5	<i>Análise dos efeitos dos sistemas de manejo nos parâmetros nitrato, fósforo e IET nas microbacias hidrográficas</i>	44
4.3.6	<i>Análise espacial das microbacias hidrográficas</i>	45
4.3.7	<i>Análise de correlação entre as variáveis estudadas nas microbacias hidrográficas.....</i>	49
4.4	Discussão	51
4.5	Conclusões	56
4.6	Referências Bibliográficas (Capítulo 1).....	58
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais características das microbacias experimentais localizadas no município de Telêmaco Borba, Paraná.	28
Tabela 2 - Operações florestais realizadas na microbacia com florestas plantadas (talhão 16A).	29
Tabela 3 - Operações florestais realizadas na microbacia com florestas plantadas (ACOM7A, ACON5A e ACON6A).	29
Tabela 4 - Precipitação média mensal com a aplicação do intervalo de confiança de $\pm 95\%$ para as microbacias de floresta nativa e plantada.	36
Tabela 5 - Vazão média mensal ($Ls^{-1}km^{-2}$) com a aplicação do intervalo de confiança de $\pm 95\%$ para as microbacias de floresta nativa e plantada.	38
Tabela 6 - Vazão média diária ($Ls^{-1}km^{-2}$) com a aplicação do intervalo de confiança de $\pm 95\%$ para as microbacias de floresta nativa e plantada.	39
Tabela 7 - Estatística básica para os valores de nitrato para as microbacias de floresta plantada e nativa.	40
Tabela 8 - Estatística básica para os valores de fósforo para as Microbacias de floresta plantada e nativa.	40
Tabela 9 - Média anual (intervalo de confiança de $\pm 95\%$) de nitrato e fósforo para as microbacias de floresta nativa e plantada.	40
Tabela 10 - Estatística básica para as Microbacias de floresta plantada e nativa, inseridas na bacia hidrográfica do Rio Tibagi, Paraná.	41
Tabela 11 - Média anual (intervalo de confiança de $\pm 95\%$) de Índice de Estado trófico (IET) para as microbacias de floresta nativa e plantada.	42
Tabela 12 - Média das estações seca e chuvosa (intervalo de confiança de $\pm 95\%$) de Índice de Estado trófico (IET) para as microbacias de floresta nativa e plantada.	43
Tabela 13 - Média do pré, durante e pós-primeiro período de manejo (intervalo de confiança de $\pm 95\%$) de Índice de Estado trófico (IET), fósforo e nitrato para as microbacias de floresta nativa e plantada, com comparação entre as mesmas microbacias.	45
Tabela 14 - Média do pré e durante o segundo período de manejo (intervalo de confiança de $\pm 95\%$) de Índice de Estado trófico (IET), fósforo e nitrato para as microbacias de floresta nativa e plantada, com comparação entre as mesmas microbacias.	45

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Participação do setor florestal no setor industrial (%).	7
Figura 2- Mapa de Localização das Microbacias de floresta plantada e nativa, inseridas na bacia hidrográfico do Rio Tibagi, Paraná.	24
Figura 3 - Mosaico das Microbacias de floresta plantada e nativa, inseridas na bacia hidrográfico do Rio Tibagi, Paraná.....	25
Figura 4 - Mapa de solos das Microbacias de floresta plantada e nativa, inseridas na bacia hidrográfico do Rio Tibagi, Paraná.....	27
Figura 5 - Estação linimétrica construída na microbacia com floresta plantada de Pinus (a esquerda) e na microbacia com vegetação nativa (a direita), localizadas em Telêmaco Borba, Paraná.....	31
Figura 6 - Média mensal de precipitação (mm) para a área de estudo.	35
Figura 7 - Precipitação total e média anual (mm) para a área de estudo.	35
Figura 8 - Vazão média mensal para a área de estudo.....	37
Figura 9 - Vazão média anual para a área de estudo.	37
Figura 10 - Classificação do índice de estado trófico com a aplicação do intervalo de confiança de $\pm 95\%$ para as microbacias de floresta nativa e plantada.	43
Figura 11 - Distribuição espacial do NDVI na microbacia de floresta nativa nos anos pré, durante e pós-manejo.	46
Figura 12 - Distribuição espacial do NDVI na microbacia de floresta plantada no primeiro período de manejo, nos anos pré, durante e pós-manejo.	47
Figura 13 - Distribuição espacial do NDVI na microbacia de floresta plantada no segundo de manejo, nos anos pré, durante e pós-manejo.	48
Figura 14 - Imagens da microbacia de floresta plantada nos anos pré e pós-manejo.....	49
Figura 15 - Classificação da correlação de Spearman para microbacia de floresta nativa.	50
Figura 16 - Classificação da correlação de Spearman para microbacia de floresta plantada.	50

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classe de estado trófico e suas características principais.	9
Quadro 2 - Características de textura do solo na microbacia composta por floresta plantada.	25
Quadro 3 - Características de fertilidade do solo na microbacia composta por floresta plantada.	26
Quadro 4 - Determinação dos parâmetros estudados.	30
Quadro 5 - Classificação do Estado Trófico para rios.	32
Quadro 6 - Classificação da correlação de Spearman.	33

LISTA DE SIGLAS

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

APP - Área de preservação permanente

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

FAO - Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura

FIEP - Federação das Indústrias do Estado do Paraná

IBÁ - Indústria brasileiras de árvores

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IET - Índice de estado trófico

IPEF - Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais

IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas

PROMAB - Programa Cooperativo de Monitoramento e Modelagem em Microbacias
Hidrográficas

SNIF - Serviço Florestal Brasileiro

UCT - Uso e cobertura da terra

1. INTRODUÇÃO GERAL

As bacias hidrográficas ocupam uma posição particularmente vulnerável diante das mudanças generalizadas no uso e na cobertura da terra. Em condições naturais, os sistemas hidrológicos mantêm equilíbrio dinâmico. No entanto, nas últimas décadas, tem-se observado intensificação das intervenções humanas na gestão da cobertura do solo, o que tem modificado significativamente a dinâmica desses sistemas (Alves *et al.*, 2021).

Estudar as modificações no meio ambiente e entender os impactos é o caminho para um crescimento econômico baseado na sustentabilidade. A água é um dos recursos naturais mais importantes para vida na terra, a alteração de sua qualidade é uma das consequências das mudanças do uso e cobertura da terra (UCT) (Oliveira *et al.*, 2023), que pode ocorrer com diferenças regionais e sazonais (Wang *et al.*, 2023).

Estudos relatam ampla gama de efeitos na qualidade da água, após atividades de operações florestais (Klavina *et al.*, 2021; Picchio, Jourgholami e Zenner, 2021; Shah *et al.*, 2022), nesse tipo de uso os indicadores de qualidade da água podem ser impactados por práticas de manejo, tais como operações de preparo do solo, fertilização e utilização de estradas durante as fases de plantio e colheita do povoamento florestal (Cardoso, 2018).

A silvicultura tem se tornado uma atividade em que a sustentabilidade é um pilar estratégico de plano de negócios, com ações nas áreas de mudanças climáticas, biodiversidade, gestão de recursos hídricos, gestão de resíduos, índice de reciclagem, energia (IBÁ, 2023). Além disso, com a expansão e crescimento financeiro, é possível visualizar a combinação entre questões ambientais e econômicas. Diante do aumento e relevância do uso, entender como o ambiente é afetado pela substituição de vegetação nativa por plantada pode auxiliar novas formas de gestão, mais eficientes.

Uma forma de mensurar as consequências das alterações do UCT na qualidade da água é por meio do índice de estado trófico (IET) e parâmetros de qualidade da água. O IET mede o fenômeno de eutrofização, um grave problema de poluição ambiental para águas interiores e representa sérias ameaças à qualidade da água (Liu *et al.*, 2022), podendo ser agravado por alteração humanas, com o enriquecimento de nutrientes, principalmente fósforo e nitrogênio (Romanelli *et al.*, 2020; Ferreira *et al.*, 2022).

O IET tem sido usado por pesquisadores para medir a qualidade da água (Cardoso, 2018; Li *et al.*, 2022; Escobar e Espino, 2023). O índice tem por finalidade classificar corpos de água em diferentes graus de trofia, ou seja, avaliar a qualidade da água quanto ao enriquecimento por nutrientes e o efeito relacionado ao crescimento excessivo do fitoplâncton (IGAM, 2024). Já o nitrato e fósforo podem ser usados como complemento na avaliação da qualidade da água, já que são os nutrientes mais utilizados em estudos para medir a eutrofização.

1.1 Justificativa

O UCT pode influenciar profundamente a qualidade da água e a saúde dos ecossistemas aquáticos. Por isso, entender e medir a extensão desses impactos é fundamental para criar estratégias eficazes de gestão das bacias hidrográficas (Locke, 2024). Estudos como os de MCdowell (2024), Locke (2024) e Levin, Curtis e Woodford (2024) demonstram como os pesquisadores têm avaliado se as modificações do UCT impactam na qualidade da água.

As florestas plantadas têm se consolidado como importante UCT no Brasil, representando um dos motores da economia nacional, com 1,3% de participação no Produto Interno Bruto (PIB) e a geração de 2,6 milhões de empregos diretos e indiretos em 2022, além de posicionar o país como o maior exportador de celulose do mundo (IBÁ, 2023). Segundo Jonsson *et al.* (2021), as florestas e a cadeia produtiva florestal são elementos fundamentais da bioeconomia terrestre, destacando-se pela priorização de materiais renováveis capazes de substituir recursos fósseis ou altamente emissores de gases de efeito estufa, promover o armazenamento de carbono em produtos de base biológica e ofertar importantes serviços ecossistêmicos (Máximo *et al.*, 2022). Nesse contexto, o setor tem se submetido voluntariamente a rigorosas certificações internacionais, colaborando de maneira estreita com a sociedade para gerar valor compartilhado e crescimento mútuo, demonstrando na prática a viabilidade da conciliação entre produção e conservação (IBÁ, 2023).

Logo, com o crescimento do setor florestal, é necessário entender com dados técnicos-científicos fundamentados em estudos se esse tipo de uso impacta os recursos hídricos, uma vez que há substituição de florestas nativas por plantadas. Segundo Shah *et al.*, (2022) a qualidade da água é geralmente alta em cursos d'água que drenam áreas florestais, no entanto, o manejo florestal pode resultar em impactos negativos na

qualidade da água e no ambiente aquático. As principais preocupações incluem poluição difusa, transporte de carbono e efeitos adversos na ecologia.

Estudos indicam variedade extensa de impactos na qualidade da água, após operações florestais, incluindo entrega de sedimentos, perdas de nutrientes, transporte de carbono, liberações de cátions metálicos e básicos e mudanças na acidez e temperatura (Ferraz *et al.*, 2021; Shah *et al.*, 2022).

1.2 Revisão de Literatura

1.2.1 Bacia hidrográfica

A bacia hidrográfica pode ser definida com toda a área de captação natural da água de chuva que escoam superficialmente para um corpo hídrico ou seu contribuinte, os limites dessas bacias são determinados pelo relevo, em que as áreas mais elevadas são chamadas de divisores de águas (SEMA - Rio Grande do Sul, 2024). Em uma bacia há várias sub-bacias ou áreas de drenagem de cada corpo hídrico, o corpo de água principal recebe contribuição dos seus afluentes sendo que cada um deles pode ter outros contribuintes menores (SEMA - Rio Grande do Sul, 2024).

De acordo com a Lei nº 9.433/1997, a bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (Brasil, 1997). Desse modo, essas unidades são de suma importância para a conservação e o manejo, uma vez que bacia mostra o reflexo das relações entre o homem e o ambiente em que vive.

A gestão de bacias hidrográficas mescla tecnologia, ciência e humanidade para colocar em prática medidas de conservação da água e do solo, a gestão bem-sucedida dessas bacias pode ter impacto não apenas em uma pequena escala hidrológica, mas em locais fora dos limites da bacia hidrográfica (Ikhlas e Ramadan, 2024).

1.2.2 Teoria do rio contínuo

A teoria do rio contínuo foi proposta em 1980 por Vannote *et al.*, segundo os autores os rios são sistemas que apresentam uma série de gradientes físicos formando um contínuo ao longo dos cursos, aos quais a comunidade biótica estaria associada. No conceito do contínuo fluvial, o rio é dividido em três partes, a primeira é formada por

cursos de ordens de 1 a 3 grau (bacias de cabeceira/nascentes), a segunda é construída de 4 a 6 grau e a terceira com rios de ordem superior a 6 (Calijuri e Bubel, 2006).

As bacias de cabeceira apresentam ambientes relativamente estáveis devido à contribuição de água subterrânea. Esses ambientes são influenciados pela cobertura florestal, cujo dossel reduz a disponibilidade de luz para fotossíntese, limitando a produção autotrófica na água. Além disso, a razão entre produção e respiração (P/R) é inferior a 1 ($P/R < 1$), o que indica alta dependência das contribuições terrestres de material orgânico. O substrato, predominantemente composto por pedras e cascalhos, e a temperatura da água, que apresenta baixa variação sazonal, reforçam a estabilidade desse ecossistema (Calijuri e Bubel, 2006).

1.2.3 Uso e cobertura da terra

O UCT pode ser definido com a separação dos termos, em que o uso diz respeito as atividades/finalidades de uma determinada área e a cobertura está ligada a composição física da superfície terrestre, identificando os diferentes tipos de elementos, sejam naturais ou artificiais. Para o (IBGE, 2024) o UCT é entendido como o conjunto de informações referentes à classificação dos tipos de cobertura e uso da terra, destinados a retratar e examinar a evolução do território em relação aos procedimentos de ocupação, à utilização do solo e suas modificações.

O UCT representa a influência interativa e abrangente entre as atividades humanas e as condições naturais, resultando em potenciais conflitos tanto entre aspectos naturais e antropogênicos quanto entre os diferentes atores envolvidos (Li *et al.*, 2024). A avaliação das modificações no UCT é fundamental para cientistas, planejadores e responsáveis pela tomada de decisões na administração de bacias hidrográficas. Esse processo possibilita a elaboração de soluções eficazes para atenuar os efeitos adversos decorrentes dessas alterações (Tilahun, Bizuneh e Mekonnen, 2024).

O meio ambiente e a sociedade são impactados de maneira significativa pelas dinâmicas de UCT, que surgem das interações complexas entre sistemas naturais e atividades humanas. Para desenvolver estratégias e planos eficientes na gestão territorial, é essencial compreender as taxas, extensões, padrões, causas e implicações das variações no UCT a nível da bacia hidrográfica (Tilahun, Bizuneh e Mekonnen, 2024).

1.2.3 Florestas plantadas

O Brasil possui a segunda maior área florestal do mundo, abrangendo 497 milhões de hectares, que corresponde a 12% de todas as florestas do planeta. Entre essas áreas, destacam-se a floresta em regeneração natural, composta predominantemente por árvores estabelecidas por processos naturais de regeneração, e a floresta plantada, formada por árvores estabelecidas por plantio e/ou semeadura deliberada (FAO, 2020).

Em terras brasileiras o cultivo de florestas teve início há mais de um século. Em 1903, o visionário Navarro de Andrade trouxe mudas de Eucalipto (*Eucalyptus spp.*) para plantações destinadas à produção de madeira para dormentes ferroviários. Posteriormente, em 1947, o Pinus (*Pinus spp.*) foi introduzido. Ambas as espécies prosperaram nas regiões em que foram implantadas, com o Eucalipto nos cerrados paulistas e o Pinus no sul do Brasil. Diante da exaustão dos recursos naturais da Mata Atlântica, o cultivo dessas espécies emergiu como alternativa viável para atender à demanda por madeira (SNIF, 2024).

No cenário atual, a extensão total de áreas destinadas ao plantio de árvores atingiu 9,94 milhões de hectares em 2022, o eucalipto, que abrange 76% da área plantada, mantém-se como a espécie dominante, totalizando 7,6 milhões de hectares. Em seguida, com 19%, encontra-se o pinus, que permanece praticamente inalterado em relação a 2021, com 1,9 milhão de hectares, outras variedades de árvores, correspondendo a 5% (IBÁ, 2023).

Segundo o SNIF (2024), entre as principais funções das florestas plantadas, destacam-se o sequestro de carbono, a reutilização de áreas degradadas, a redução da pressão sobre florestas nativas, a proteção do solo e da água, além dos ciclos de rotação mais curtos em comparação às regiões de clima temperado e da maior uniformidade dos produtos, facilitando a integração com maquinário industrial. Quando manejadas de forma sustentável, as florestas plantadas fornecem matérias-primas para a fabricação de produtos que podem contribuir significativamente para a mitigação das mudanças climáticas, seja por meio do armazenamento de carbono a longo prazo em produtos de madeira (como edificações e mobiliário) ou pela substituição de materiais não renováveis e intensivos em emissões de gases de efeito estufa, como os bioplásticos que substituem plásticos de origem fóssil (Máximo *et al.*, 2022).

1.2.4 Florestas plantadas em mosaico

As florestas desempenham papel fundamental na provisão de serviços ecossistêmicos em diferentes escalas. Diante da atual tendência de redução das áreas de florestas nativas e da expansão dos plantios florestais, torna-se indispensável que os gestores implementem estratégias capazes de maximizar a oferta de múltiplos benefícios socioeconômicos e ecológicos (Balieiro *et al.*, 2020).

A inserção de mosaicos compostos, por florestas exóticas plantadas e fragmentos de vegetação nativa, na matriz da paisagem rural contribui significativamente para as diferentes dimensões da sustentabilidade. Além disso, o aumento da diversidade estrutural e funcional dessas plantações favorece o surgimento de maior variedade de serviços ecossistêmicos, ampliando os benefícios ambientais e sociais associados ao uso da terra (Balieiro *et al.*, 2020).

Empresas líderes no setor de florestas plantadas têm adotado o modelo de manejo em mosaico. De acordo com a Klabin (2025), essa abordagem combina extensas áreas de florestas nativas preservadas, representando a metade do território florestal da companhia, com plantações florestais em diferentes estágios de desenvolvimento. Esse tipo de manejo contribui para a proteção dos recursos naturais, potencializa a produtividade das florestas e favorece a conservação da biodiversidade por meio de corredores ecológicos, que permitem a movimentação de diversas espécies de fauna silvestre.

1.2.5 Setor Florestal

O setor florestal está em constante evolução, desempenhando papel cada vez mais significativo no Produto Interno Bruto (PIB) do Brasil. A criação contínua de empregos ocorre anualmente com a instalação de novas fábricas e filiais, juntamente com a aquisição de áreas adicionais de cultivo por grandes empresas, inclusive em locais designados como áreas de proteção permanente (Sousa *et al.*, 2021).

Em termos de participação, no ano de 2022, após a elevação do valor adicionado superar o crescimento do Produto Interno Bruto (PIB) no Brasil, o setor florestal passou a contribuir com 1,3% do PIB brasileiro, o melhor resultado desde 2012 (IBÁ, 2023).

Para contextualizar a relevância desse setor para a economia brasileira, ele figura em posição significativa no ranking das 50 atividades com maior valor adicionado ao país. A cadeia produtiva de base florestal ocupa a 22^a posição entre as atividades mais

impactantes em termos de contribuição, com dados estimados para a média do período de 2010 a 2022. Vale observar que, de forma geral, as atividades mais influentes na economia pertencem ao setor de serviços (IBÁ, 2023).

Divergindo da tendência de desindustrialização enfrentada pelo Brasil, o setor de base florestal tem experimentado um crescimento notável. A produção de celulose registrou aumento de 10,2%, enquanto a produção de papel apresentou acréscimo de 3,5%. A contribuição da cadeia produtiva de árvores para o valor adicionado da atividade industrial atingiu 7,2% em 2022 (Figura 1).

Figura 1 - Participação do setor florestal no setor industrial (%).



Fonte: (IBÁ, 2023).

A indústria de base florestal plantada tem consolidado ao longo das décadas como um modelo abrangente de bioeconomia em grande escala, voluntariamente sujeitando-se a rigorosas certificações internacionais. Este setor colabora de maneira efetiva com a sociedade na geração de valor compartilhado e crescimento mútuo, demonstrando, na prática, a harmonia entre produzir e conservar (IBÁ, 2023). Um exemplo dessa contribuição é o elevado índice de reciclagem de papel para embalagens consumido no país, que alcançou 75,8% em 2022 (IBÁ, 2023).

Seguindo uma tendência observada em vários países, a estratégia de bioeconomia do Brasil visa promover o desenvolvimento sustentável. Atualmente, o país é um dos maiores produtores de biomassa florestal, desempenhando papel relevante nos mercados globais de produtos florestais. A indústria de celulose e papel, principal consumidora de matérias-primas provenientes de florestas plantadas, tem demonstrado interesse em processar seus subprodutos, como lignina e tall oil, além de desenvolver produtos de maior valor agregado, como celulose solúvel e celulose nanocristalina (Máximo *et al.*, 2022).

1.2.6 Índice de estado trófico

A eutrofização é um processo provocado pela entrada excessiva de nutrientes limitantes, como fosfatos e nitratos, em corpos d'água, incluindo lagos, reservatórios, rios, riachos, zonas úmidas e ecossistemas marinhos costeiros. Esse enriquecimento de nutrientes pode causar impactos negativos não apenas no meio ambiente, mas também na economia e no bem-estar público (Escobar e Espino, 2023).

Para Esteves (2011) eutrofização pode ser definida como aumento da concentração de nutrientes, especialmente fósforo e nitrogênio, nos ecossistemas aquáticos, que tem como consequência a elevação de produtividade.

Entre os efeitos indesejáveis da eutrofização, há: contaminação da água usada no abastecimento público, odores e mortandade de peixes, alterações na biodiversidade aquática, diminuição na navegação e capacidade de transporte, mudanças na qualidade e quantidade de peixes de valor comercial, produção de energia hidroelétrica pode ser afetada pelo surgimento extremo de macrófitas aquáticas. Em determinadas situações, as toxinas podem persistir na água mesmo após o processo de tratamento, agravando os efeitos crônicos (ANA, 2024).

Em casos de reservatório, a proliferação de cianobactéria, que possuem como principal habilidade produzir metabólitos secundários, chamados de cianotoxinas, podem levar a ocorrências de intoxicação em humanos, animais domésticos e selvagens (Silva, 2023).

Para calcular o nível de eutrofização, pode-se usar o Índice do Estado Trófico (IET), que tem como propósito categorizar corpos d'água em diversos graus de trofia, ou seja, avaliar a qualidade da água em relação ao acúmulo de nutrientes e o impacto associado ao crescimento excessivo de algas ou ao aumento da infestação de macrófitas aquáticas. Neste índice, os resultados obtidos a partir dos valores de fósforo devem ser interpretados como uma medida do potencial de eutrofização, dado que este nutriente desempenha papel fundamental no desencadeamento desse processo (ANA, 2024).

No contexto de rios, o cálculo do IET, a partir dos valores de fósforo total, segue a fórmula conforme definida por (Lamparelli, 2004). As classes de trofia e suas características são apresentadas na Quadro 1.

Quadro 1 - Classe de estado trófico e suas características principais.

Valor do IET	Classes de Estado Trófico	Características
= 47	Ultraoligotrófico	Corpos d'água limpos, de produtividade muito baixa e concentrações insignificantes de nutrientes que não acarretam prejuízos aos usos da água.
47 < IET = 52	Oligotrófico	Corpos d'água limpos, de baixa produtividade, em que não ocorrem interferências indesejáveis sobre os usos da água, decorrentes da presença de nutrientes.
52 < IET = 59	Mesotrófico	Corpos d'água com produtividade intermediária, com possíveis implicações sobre a qualidade da água, mas em níveis aceitáveis, na maioria dos casos.
59 < IET = 63	Eutrófico	Corpos d'água com alta produtividade em relação às condições naturais, com redução da transparência, em geral afetados por atividades antrópicas, nos quais ocorrem alterações indesejáveis na qualidade da água decorrentes do aumento da concentração de nutrientes e interferências nos múltiplos usos.
63 < IET = 67	Supereutrófico	Corpos d'água com alta produtividade em relação às condições naturais, de baixa transparência, em geral afetados por atividades antrópicas, nos quais ocorrem com frequência alterações indesejáveis na qualidade da água, como a ocorrência de episódios florações de algas, e interferências nos múltiplos usos.
> 67	Hipereutrófico	Corpos d'água afetados significativamente pelas elevadas concentrações de matéria orgânica e nutrientes, com comprometimento acentuado nos usos, associado a episódios florações de algas ou mortandades de peixes, com consequências indesejáveis para seus múltiplos usos, inclusive sobre as atividades pecuárias nas regiões ribeirinhas.

Fontes: (CETESB, 2007; Lamparelli, 2004).

1.2.7 Fósforo e nitrato

O fósforo é obtido pela extração de rochas fosfáticas, também chamadas de fosforite, que são fontes não renováveis. Juntamente com o nitrogênio e o potássio, compõe o clássico trio de nutrientes essenciais para as plantas, sendo amplamente utilizado para garantir altos rendimentos nas culturas agrícolas (Pantano *et al.*, 2016).

A interferência no ciclo do fósforo resultou em aumento significativo das concentrações desse elemento em águas superficiais, levando à eutrofização artificial, frequentemente denominada apenas eutrofização. Além disso, a necessidade contínua de aplicação de fertilizantes tornou-se essencial para repor o fósforo perdido do solo devido à colheita e erosão (Pantano *et al.*, 2016).

A aplicação prolongada de fertilizantes enriquecidos com fósforo e esterco animal resulta no acúmulo desse elemento no solo, tornando-o suscetível à mobilização por meio de erosão, escoamento superficial e lixiviação subterrânea. Em escala global, os fertilizantes de fósforo altamente solúveis em água usados na agricultura têm contribuído para a eutrofização e hipóxia em águas superficiais (Haque, 2021).

O nitrato é a forma mais oxidada do nitrogênio e é gerado nas fases finais da decomposição biológica, tanto em estações de tratamento de água quanto nos mananciais naturais (Pereira *et al.*, 2020). Nos corpos d'água, o nitrogênio pode ser encontrado nas formas orgânica, amoniacal, de nitrito e de nitrato. Quando em concentrações elevadas, os nitratos são tóxicos para os seres humanos e podem causar metahemoglobinemia infantil, uma condição potencialmente fatal para crianças (ANA, 2025).

Por serem nutrientes essenciais nos processos biológicos, os compostos de nitrogênio, quando lançados em grande quantidade nos corpos d'água, juntamente com outros elementos como o fósforo, favorecem o crescimento excessivo de algas. Esse fenômeno conhecido como eutrofização, compromete o abastecimento de água, a recreação e a preservação da vida aquática (ANA, 2025).

As fontes de nitrogênio na água são variadas, destacando-se o lançamento de esgotos sanitários e efluentes industriais. Em áreas agrícolas, o escoamento superficial da água da chuva em solos fertilizados também contribui para o aumento desse elemento, assim como a drenagem de águas pluviais em regiões urbanas. Além disso, ocorre a fixação biológica do nitrogênio atmosférico por algas, bactérias e outros processos, como a deposição atmosférica por meio das chuvas, também promovem a entrada de nitrogênio nos corpos d'água (ANA, 2025).

A contaminação da água por nitrato é um problema ambiental global, geralmente resultante de atividades humanas. O excesso de nitrogênio proveniente da agricultura e de áreas urbanas favorece a lixiviação de nitrato (e outras formas de nitrogênio) para as águas subterrâneas, além do escoamento superficial, impactando o ambiente aquático (Romanelli, *et al.*, 2020).

1.2.8 Geoprocessamento aplicado à gestão hídrica

As florestas plantadas oferecem variedade de funções e serviços ecológicos significativos, sendo uma abordagem importante para a restauração ambiental. No entanto, o mapeamento dessas florestas por meio de dados de sensoriamento remoto ainda apresenta desafios, devido às semelhanças nas características espectrais, estruturais do dossel e fenológicas entre florestas plantadas e outros tipos de vegetação (Meng *et al.*, 2022).

O crescimento vegetativo dos dosséis florestais modifica a resposta espectral, podendo ser detectado por sensores multiespectrais e aprimorado com a utilização do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) (Berveglieri *et al.*, 2021). O NDVI tem demonstrado desempenho satisfatório, com incerteza relativamente baixa, alcançando precisão geral de 93,65% e valor kappa de 0,92 (Meng *et al.*, 2022).

Diversos fatores perturbadores, como eventos climáticos extremos, incêndios e infestações de insetos, impactam significativamente os ecossistemas florestais, com variações esperadas entre florestas plantadas e naturais. Contudo, ainda há pouca informação sobre a dinâmica espaço-temporal desses distúrbios em diferentes tipos de cobertura florestal. Nessa perspectiva, o NDVI tem sido utilizado como ferramenta para análise, detecção e monitoramento dessas alterações (Tao *et al.*, 2023).

O NDVI, proposto por Rouse *et al.* (1973) quantifica a presença e a condição da vegetação, variando entre -1 e +1 (Defeo e Esquerdo, 2016). Valores próximos de +1 indicam vegetação densa e saudável, enquanto valores próximos de zero indicam solo exposto ou corpos d'água, e valores negativos refletem a presença de nuvens ou outros elementos não vegetados.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Comparar os impactos da substituição de floresta nativa por floresta plantada na qualidade da água de microbacias hidrográficas experimentais.

2.2 Objetivos específicos

- ✓ Avaliar a variação temporal dos parâmetros de qualidade da água em duas microbacias hidrográficas, sendo uma com cobertura de floresta plantada e outra de floresta nativa;
- ✓ Determinar as concentrações de fósforo total e nitrato para duas microbacias hidrográficas experimentais;
- ✓ Calcular o índice de estado trófico para duas microbacias hidrográficas experimentais;
- ✓ Avaliar as mudanças do uso e cobertura da terra em períodos de manejo florestal, com o uso do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI).

3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, W. S. *et al.* Geotechnologies applied in the analysis of land use and land cover (LULC) transition in a hydrographic basin in the Brazilian Cerrado. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 22, p. 100495, abr. 2021.

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). **PORTAL DA QUALIDADE DAS ÁGUAS: INDICADORES DE QUALIDADE - ÍNDICE DO ESTADO TRÓFICO (IET)**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/portalnqa/indicadores-estado-trofico.aspx>>. Acesso em: 2 fev. 2024.

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). **PORTAL DA QUALIDADE DAS ÁGUAS: Indicadores de Qualidade - Índice de Qualidade das Águas (IQA)**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/portalnqa/indicadores-idade-aguas.aspx>>. Acesso em: 30 mar. 2025.

BALIEIRO, C. F *et al.* Ecosystem services in Eucalyptus planted forests and mixed and multifunctional planted forests. **Mixed plantations of Eucalyptus and leguminous trees: soil, microbiology and ecosystem services**, p. 193-219, 2020.

BERVEGLIERI, A. *et al.* Analysis of trends and changes in the successional trajectories of tropical forest using the Landsat NDVI time series. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 24, p. 100622, 2021.

BRASIL. LEI Nº 9.433, DE 8 DE JANEIRO DE 1997. **Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos e dá outras providências**Diário Oficial da República Federativa do Brasil. Brasília, DF, 9 de janeiro de 1997, 1997.

CALIJURI, M. C. e BUBEL, A. P. M. **Conceituação de microbacias. As florestas plantadas e a água: implementando o conceito da microbacia hidrográfica como unidade de planejamento**. Tradução. São Carlos: RiMa, 2006. Acesso em: 25 dez. 2024.

CARDOSO, K. M. **ANÁLISE DA DINÂMICA DE PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ÁGUA EM MICROBACIAS HIDROGRÁFICAS COM VEGETAÇÃO NATIVA E COM FLORESTAS PLANTADAS DE Pinus**. 2018.

Dissertação (Mestrado) - Unesp Campus de Botucatu, Programa Pós-Graduação em Ciência Florestal, Botucatu, 2018.

CETESB. **Relatório de Qualidade das Águas Interiores no Estado de São Paulo: 2006**. Série Relatórios—São Paulo: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2007.

DEFEO, L. F. *et al.* Utilização de índices de vegetação NDVI e EVI do sensor MODIS para caracterização espectro-temporal de coberturas vegetais do Pantanal. In: **SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS NO PANTANAL**, 6., 2016, Cuiabá, MT. Anais... Cuiabá, MT: Embrapa Informática Agropecuária / INPE, 2016. p. 141-149.

ESCOBER, E. J.; ESPINO, M. P. A new trophic state index for assessing eutrophication of Laguna de Bay, Philippines. **Environmental Advances**, v. 13, p. 100410, out. 2023.

ESTEVES, F. DE A. **Fundamentos de Limnologia**. Rio de Janeiro: Interciência, 2011.

JONSSON, R. *et al.* Boosting the EU forest-based bioeconomy: Market, climate, and employment impacts. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 163, p. 120478, 2021.

HAQUE, S. E. How effective are existing phosphorus management strategies in mitigating surface water quality problems in the US?. **Sustainability**, v. 13, n. 12, p. 6565, 2021.

Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ). **Relatório IBÁ 2023**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2023-r.pdf>>. Acesso em: 2 jan. 2024.

Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO). **Global Forest Assessment Resources 2020 Main Report**; FAO: Rome, Italy, 2020.

FERRAZ, S. F. B *et al.* How do management alternatives of fast-growing forests affect water quantity and quality in southeastern Brazil? Insights from a paired catchment experiment. **Hydrological Processes**, v. 35, n. 9, p. e14317, 2021.

FERREIRA, L. D. S. *et al.* Concentração de Clorofila e Parâmetros Físico-Químicos para Avaliação de Níveis de Eutrofização do Rio Cereja Bragança-Pa. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, n. 5, p. 2153-2163, 2022.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Cobertura e uso da terra**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/cobertura-e-uso-da-terra.html>>. Acesso em: 2 fev. 2024.

Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM). **Índice de Estado Trófico – IET**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://portalinfohidro.igam.mg.gov.br/sem-categoria/322-indice-de-estado-trofico-iet>>. Acesso em: 3 fev. 2024.

IKHLAS, N.; RAMADAN, B. S. Community-based watershed management (CBWM) for climate change adaptation and mitigation: Research trends, gaps, and factors assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 434, p. 140031, jan. 2024.

KLABIN. Manejo florestal. 2025. Disponível em: <https://klabin.com.br/negocios-e-produtos/florestal/manejo-florestal>. Acesso em: 13 jul. 2025.

KLAVINA, Z. *et al.* Carbon, nutrients and methylmercury in water from small catchments affected by various forest management operations. **Forests**, v. 12, n. 9, p. 1278, 2021.

LAMPARELLI, M. C. **Grau de trofia em corpos d'água do Estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento**. Tese (Doutorado em ciências na Área de Ecossistemas Terrestres e Aquáticos)—São Paulo: Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, 2004.

LEVIN, J. C.; CURTIS, C. J.; WOODFORD, D. J. A multi-spatial scale assessment of land-use stress on water quality in headwater streams in the Platinum Belt, South Africa. **Science of the Total Environment**, v. 927, p. 172180, 2024.

LIU, Y. *et al.* Evaluation of trophic state for inland waters through combining Forel-Ule Index and inherent optical properties. **Science of the Total Environment**, v. 820, p. 153316, 2022.

LI, S. *et al.* Mapping the trophic state index of eastern lakes in China using an empirical model and Sentinel-2 imagery data. **Journal of Hydrology**, v. 608, p. 127613, maio 2022.

LI, Y. *et al.* Dynamics of Land Use/Land Cover (LULC) Considering Ecosystem Services for a Dense-Population Watershed Based on a Hybrid Dual-Subject Agent and Cellular Automaton Modeling Approach. **Engineering**, fev. 2024.

LOCKE, K. A. Modelling relationships between land use and water quality using statistical methods: A critical and applied review. **Journal of Environmental Management**, v. 362, p. 121290, 2024.

MÁXIMO, Y. I. *et al.* Forest bioeconomy in Brazil: Potential innovative products from the forest sector. **Land**, v. 11, n. 8, p. 1297, 2022.

MENG, Y. *et al.* A planted forest mapping method based on long-term change trend features derived from dense Landsat time series in an ecological restoration region. **Remote Sensing**, v. 14, n. 4, p. 961, 2022.

MCDOWELL, R. *et al.* Difficulties in using land use pressure and soil quality indicators to predict water quality. **Science of The Total Environment**, p. 173445, 2024.

OLIVEIRA, V. C. *et al.* Uso de estatística multivariada para avaliação de parâmetros de qualidade da água na Bacia do Rio Paracatu. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v. 11, n. 2, 2023.

PANTANO, G. *et al.* Sustentabilidade no uso do fósforo: uma questão de segurança hídrica e alimentar. **Química Nova**, v. 39, n. 6, p. 732-740, 2016.

PEREIRA, M. A. B. *et al.* Qualidade Hídrica da Cachoeira do Rio São Tomás, no Município de Rio Verde, Goiás, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 1, p. 377-390, 2020.

PICCHIO, R.; JOURGHOLAMI, M.; ZENNER, E. K. Effects of Forest Harvesting on Water and Sediment Yields: a Review Toward Better Mitigation and Rehabilitation Strategies. **Curr Forestry Rep** 7, 214–229, 2021. <https://doi.org/10.1007/s40725-021-00146-7>.

ROMANELLI, A. *et al.* A biological and nitrate isotopic assessment framework to understand eutrophication in aquatic ecosystems. **Science of the Total Environment**, v. 715, p. 136909, 2020.

SHAH, N. W. *et al.* The effects of forest management on water quality. **Forest Ecology and Management**, v. 522, p. 120397, 2022.

SEMA - RIO GRANDE DO SUL. **Dados Gerais das Bacias Hidrográficas**. Rio Grande do Sul: [s.n.]. Disponível em: <<https://sema.rs.gov.br/bacias-hidrograficas#:~:text=Entende-se>>. Acesso em: 2 fev. 2024.

SILVA, T. A. **CIANOTOXINAS: IMPACTO NA QUALIDADE E DISPONIBILIDADE DE ÁGUA**. Monografia (Programa de Residência)—Garanhuns-PE: Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2023.

Serviço florestal brasileiro (SNIF). **Sistema Nacional de Informações Florestais: Florestas Plantadas**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://snif.florestal.gov.br/pt-br/florestas-plantadas/>>. Acesso em: 2 fev. 2024.

SOUSA, L. F. DA C. E *et al.* Modelo de ranqueamento empresarial para análise da relevância das empresas no setor de florestas plantadas. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 41, 27 jan. 2021.

TAO, C. *et al.* Spatio-Temporal Dynamic of Disturbances in Planted and Natural Forests for the Saihanba Region of China. **Remote Sensing**, v. 15, n. 19, p. 4776, 2023.

TILAHUN, Z. A.; BIZUNEH, Y. K.; MEKONNEN, A. G. A spatio-temporal analysis of the magnitude and trend of land use/land cover changes in Gilgel Gibe Catchment, Southwest Ethiopia. **Heliyon**, v. 10, n. 2, p. e24416, jan. 2024.

WANG, H. *et al.* The effects of land use on water quality of alpine rivers: A case study in Qilian Mountain, China. **Science of the Total Environment**, v. 875, p. 162696, 2023.

4. CAPÍTULO 1 – ARTIGO 1

ANÁLISE DOS IMPACTOS DA SUBSTITUIÇÃO DE FLORESTAS NATIVAS POR FLORESTAS PLANTADAS SOBRE A QUALIDADE DA ÁGUA EM MICROBACIAS HIDROGRÁFICAS

RESUMO

As microbacias são áreas que refletem a combinação dos aspectos físicos com as ações antrópicas. Um dos indicadores da influência do homem no meio é a qualidade da água, que pode ser quantificada por meio do Índice de Estado Trófico (IET), que mede o grau de trofia dos corpos hídricos e os parâmetros de qualidade da água. O estudo teve como objetivo analisar o impacto da substituição de vegetação nativa por plantada na qualidade da água, por meio do IET, e os parâmetros fósforo total, precipitação, vazão e nitrato. O experimento foi conduzido em duas microbacias localizadas em Telêmaco Borba (PR), sendo uma composta por floresta nativa e a outra por floresta plantada em mosaico, ambas com APP. O IET utilizado foi calculado a partir do fósforo total. Os dados foram coletados de 2004 a 2024, pelo Programa Cooperativo sobre Monitoramento e Modelagem de Bacias Hidrográficas, em colaboração com a empresa responsável pela área e o Laboratório de Hidrologia Florestal da ESALQ/USP. Os valores de nitrato na microbacia com floresta plantada foram superiores aos da microbacia nativa em anos com eventos extremos de precipitação (2009, 2015 e no período chuvoso de 2023). Quanto ao fósforo, a bacia nativa apresentou, na maioria dos anos, concentrações significativamente mais altas, o que pode estar relacionado com a maior proporção de silte em seu solo, favorecendo a retenção de fósforo ligado a minerais primários menos suscetíveis ao intemperismo. Nos anos de 2004, 2008 e 2022, a microbacia com cobertura florestal plantada apresentou valores de fósforo mais elevados, embora sem diferença estatisticamente significativa. Nesses mesmos períodos, a vazão manteve-se abaixo da média histórica, o que reforça a influência da correlação negativa observada entre fósforo e vazão. Em relação ao IET, os valores foram semelhantes entre as microbacias, variando entre as classes ultraoligotrófica e mesotrófica. Entretanto, a microbacia nativa apresentou médias superiores na maioria dos anos, possivelmente em função da textura do solo, conforme mencionado anteriormente. A aplicação do NDVI permitiu identificar de forma clara os períodos de manejo florestal e o tempo necessário para a recuperação da cobertura vegetal. De modo geral, para todos os parâmetros analisados, os anos de manejo e pós-manejo não apresentaram alterações negativas na qualidade da água, indicando que a substituição da vegetação nativa por florestas plantadas, quando bem conduzida, não compromete significativamente os indicadores de qualidade hídrica. Ainda assim, destaca-se a importância de manter o monitoramento contínuo, especialmente diante da expansão crescente das áreas com florestas plantadas no Brasil.

Palavras-chave: Monitoramento ambiental, Qualidade hídrica, Silvicultura.

ABSTRACT

Microbasins are areas that reflect the combination of physical aspects and human actions. One of the indicators of human influence on the environment is water quality, which can be quantified by means of the Trophic State Index (TSI), which measures the degree of trophicity of watersheds. The study aimed to analyze the impact of replacing native vegetation with planted vegetation on water quality, using the TSI, a crucial indicator that assesses the degree of eutrophication in watersheds. The experiment was conducted in two microbasins located in Telêmaco Borba (PR), one composed of native forest and the other of planted forest, both with APP. The TSI used was calculated from total phosphorus, together with precipitation, flow and nitrate parameters. Data were collected from 2004 to 2024 by the Cooperative Program on Monitoring and Modeling of River Basins, in collaboration with the company responsible for the area and the Forest Hydrology Laboratory of ESALQ/USP. Nitrate values in the basin with planted forest were higher than those in the native basin in years with extreme precipitation events (2009, 2015, and in the rainy season of 2023). As for phosphorus, the native basin presented significantly higher concentrations in most years, which may be related to the higher proportion of silt in this soil, favoring the retention of phosphorus bound to primary minerals less susceptible to weathering. In the years in which the planted basin presented higher values (2004, 2008, and 2022), the flow was below average, reinforcing the influence of the negative correlation between phosphorus and flow. Regarding the TSI, the values were similar between the basins, varying between the ultraoligotrophic and mesotrophic classes, although the native basin presented higher averages in most years, due to the texture characteristic mentioned above. The NDVI application allowed for a clear identification of the periods of forest management and the time required for the recovery of the vegetation cover. In general, for all the parameters analyzed, the years of management and post-management did not present negative changes in water quality, indicating that the replacement of native vegetation by planted forests, when well-managed, does not significantly compromise water quality indicators. Even so, the importance of maintaining continuous monitoring is highlighted, especially given the growing expansion of areas with planted forests in Brazil.

Keywords: Environmental monitoring, Water quality, Forestry.

4.1 Introdução

O uso e cobertura da terra (UCT) representam as influências interativas e abrangentes entre as atividades humanas e as condições naturais, podendo resultar em potenciais conflitos entre questões naturais e relacionadas ao homem, e entre as partes envolvidas (Li *et al.*, 2024). Os padrões de UCT geralmente impactam a qualidade da água dos rios por meio de fontes de poluição difusas em escalas espaciais e sazonais, podendo fornecer orientação relevantes para o controle da poluição da água e o planejamento do UCT, após uma análise quantitativa (Wang *et al.*, 2024).

Diferentes tipos de UCT podem apresentar distintos impactos ambientais. Entre os UCT, a plantação florestal tem potencial econômico, social e ecológico, como a oportunidade de empregos, renda e desenvolvimento econômico, ou possível armazenamento de carbono e proteção do solo, no entanto, se mal administrado e integrado ao espaço, o plantio florestal, demonstrou gerar conflitos ambientais com as partes interessadas nas proximidades das plantações. Para evitar e gerenciar tais conflitos, é essencial a compreensão profunda das causas fundamentais (Braun, 2021).

O manejo intensivo das florestas plantadas, marcado pela alta eficiência produtiva, crescimento acelerado e rotações de ciclo breve, além do crescimento do setor florestal, têm causado preocupações em relação aos impactos na quantidade e na qualidade dos recursos hídricos (Rodrigues *et al.* 2020). O reflorestamento também pode gerar poluição difusa pela perturbação do solo durante a implantação da floresta e as primeiras etapas do manejo florestal. Essas fontes difusas são mais complexas de controlar e monitorar, dificultando a análise dos impactos ambientais (Duffy *et al.*, 2020).

Com o crescimento das florestas plantadas e seu potencial como alternativa de produção sustentáveis, estudos que mostrem o impacto desse tipo de uso são essenciais, principalmente ligados aos recursos hídricos (Rodrigues *et al.*, 2020; Cardoso, Zakia e Rodrigues, 2022). A crescente demanda por água e o agravamento das alterações climáticas exercem pressão considerável sobre esse recurso vital, destacando a preservação da água como prioridade global. Sendo assim, programas de monitoramento da qualidade da água desempenham papel crucial na gestão eficaz desse recurso, fornecendo informações valiosas para tomar decisões e implementar estratégias de conservação (Amador-Castro *et al.*, 2024).

O Programa Cooperativo de Monitoramento e Modelagem em Microbacias Hidrográficas (PROMAB) tem como metodologia principal o monitoramento de

microbacias em áreas de empresas florestais renomadas, para compreender e elaborar estratégias de manejo e planejamento das florestas plantadas, com foco nos recursos hídricos. Este programa acumulou resultados significativos sobre recursos hídricos, em algumas microbacias com mais de uma década de acompanhamento. Os programas de monitoramento normalmente investigam parâmetro e índices de qualidade de água, com o intuito de identificar impactos nos recursos hídrico, a eutrofização é um dos exemplos dos impactos que podem ser estudados por esses programas.

A eutrofização das águas interiores é um fenômeno de causa, principalmente antropogênico que afeta a biodiversidade aquática em todo o planeta e pode modificar a estrutura da comunidade biótica e as funções dos ecossistemas (Zuo *et al.*, 2024). Uma das formas de medir a eutrofização é por meio do Índice de Estado Trófico (IET), o Índice visa classificar corpos d'água em distintos graus de trofia, ou seja, avaliar a qualidade da água em relação ao enriquecimento por nutrientes e o efeito associado ao crescimento excessivo do fitoplâncton (IGAM, 2025). Os resultados derivados do IET utilizando fósforo, devem ser interpretados como medida do potencial de eutrofização, uma vez que esse nutriente desempenha o papel de agente desencadeador desse processo (IGAM, 2024; Wojtkowska e Bojanowski, 2021).

Diversos estudos têm utilizado o fósforo como indicador da trofia de corpos hídricos, tanto no Brasil, como em Araújo *et al.* (2022) e Cardoso, Zakia e Rodrigues (2022), quanto em outros países, como nos trabalhos de Wojtkowska e Bojanowski (2021) e Labat e Thiebaut (2023).

O objetivo deste estudo foi avaliar os efeitos da substituição da floresta nativa por floresta plantada sobre a qualidade da água em duas microbacias hidrográficas localizadas no município de Telêmaco Borba (PR). Foram utilizados o IET, os parâmetros de qualidade da água nitrato e fósforo e o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI). A análise do IET foi realizada com base na adaptação proposta por Lamparelli (2004), com dados fornecidos pelo PROMAB.

4.2 Material e Métodos

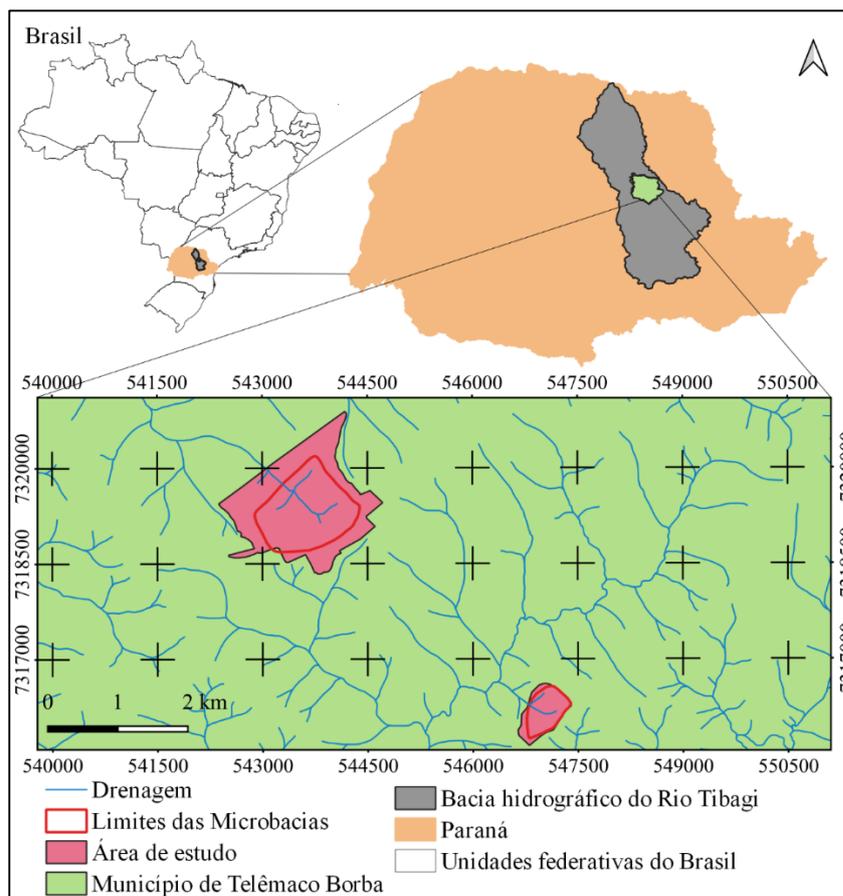
4.2.1 Área de estudo

O estudo foi realizado em duas microbacias localizadas no município de Telêmaco Borba, nas coordenadas 24°02' Latitude Sul e 50°17' Longitude Oeste, fazendo parte da bacia hidrográfica do Rio Tibagi, apresentando da Figura 2.

O município de Telêmaco Borba possui uma população de 75.042 habitantes, ocupando a vigésima oitava posição de municípios mais habitados do Paraná (IBGE, 2024). A cidade é conhecida no Paraná como a capital do papel e da madeira, sendo um centro de referência nacional no setor madeireiro, e está localizada a maior fábrica de papel da América Latina, a unidade Monte Alegre das indústrias Klabin (FIEP, 2024). Em 2016, 43,38% da produção de madeira para papel e celulose no estado do Paraná veio do município Telêmaco Borba (LIMA, 2021). Segundo o IBGE (2022) o município é um dos mais influentes no ramo da silvicultura no Brasil, no ano de 2022 Telêmaco Borba ocupou o segundo lugar no ranking de municípios de valor da produção da silvicultura no país, com R\$ 524,5 milhões.

A cidade também possui duas usinas hidrelétricas: a Presidente Vargas, inaugurada em 1953, e a Hidrelétrica Mauá, construída no Rio Tibagi, entre os municípios paranaenses de Telêmaco Borba e Ortigueira (FIEP, 2024).

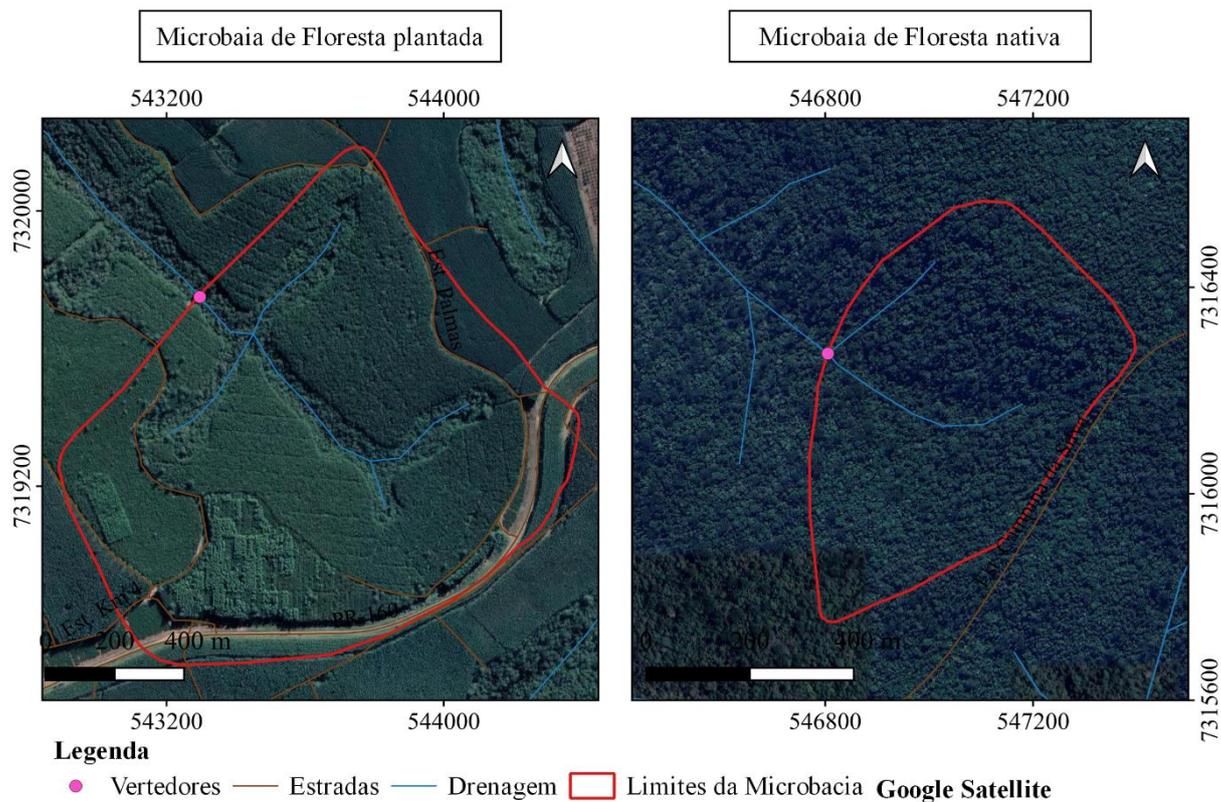
Figura 2- Mapa de Localização das Microbacias de floresta plantada e nativa, inseridas na bacia hidrográfico do Rio Tibagi, Paraná.



Fonte: elaborado pelo autor.

A microbacia com floresta plantada de *Pinus* possui área 135,7 ha, sendo 85% dessa área coberta por plantios de *Pinus* e os outros 15% de Área de Preservação Permanente (APP). Por sua vez, a microbacia com vegetação nativa apresenta área de 33,9 ha (Figura 3).

Figura 3 - Mosaico das Microbacias de floresta plantada e nativa, inseridas na bacia hidrográfico do Rio Tibagi, Paraná.



Fonte: elaborado pelo autor.

A microbacia com floresta plantada possui como predominantes os Latossolos Vermelhos Escuros com textura argilosa no horizonte “A” moderado, no entanto, próximos aos canais, possui também Cambissolos e Argissolos, com texturas franco arenosa e franco argilosa, álico e revelo ondulado no horizonte “A” respectivamente. A microbacia com vegetação nativa é caracterizada pela predominância de Neossolos Litólicos, com textura franca no horizonte “A” proeminente, álico e relevo ondulado (Voigtlaender, 2007), o mapa de solos é apresentado na Figura 4.

A textura e a fertilidade do solo da microbacia de floresta plantada são apresentadas no Quadro 2 e 3, respectivamente.

Quadro 2 - Características de textura do solo na microbacia composta por floresta plantada.

Características de Textura	Profundida (cm)	Microbacias	
		Floresta Plantada	Floresta Nativa

Areia Total (%)	0 - 20	44	43
	20 - 60	39	42
	60 - 100	35	36
Silte (%)	0 - 20	20	35
	20 - 60	19	32
	60 - 100	19	33
Argila (%)	0 - 20	37	22
	20 - 60	43	27
	60 - 100	45	31

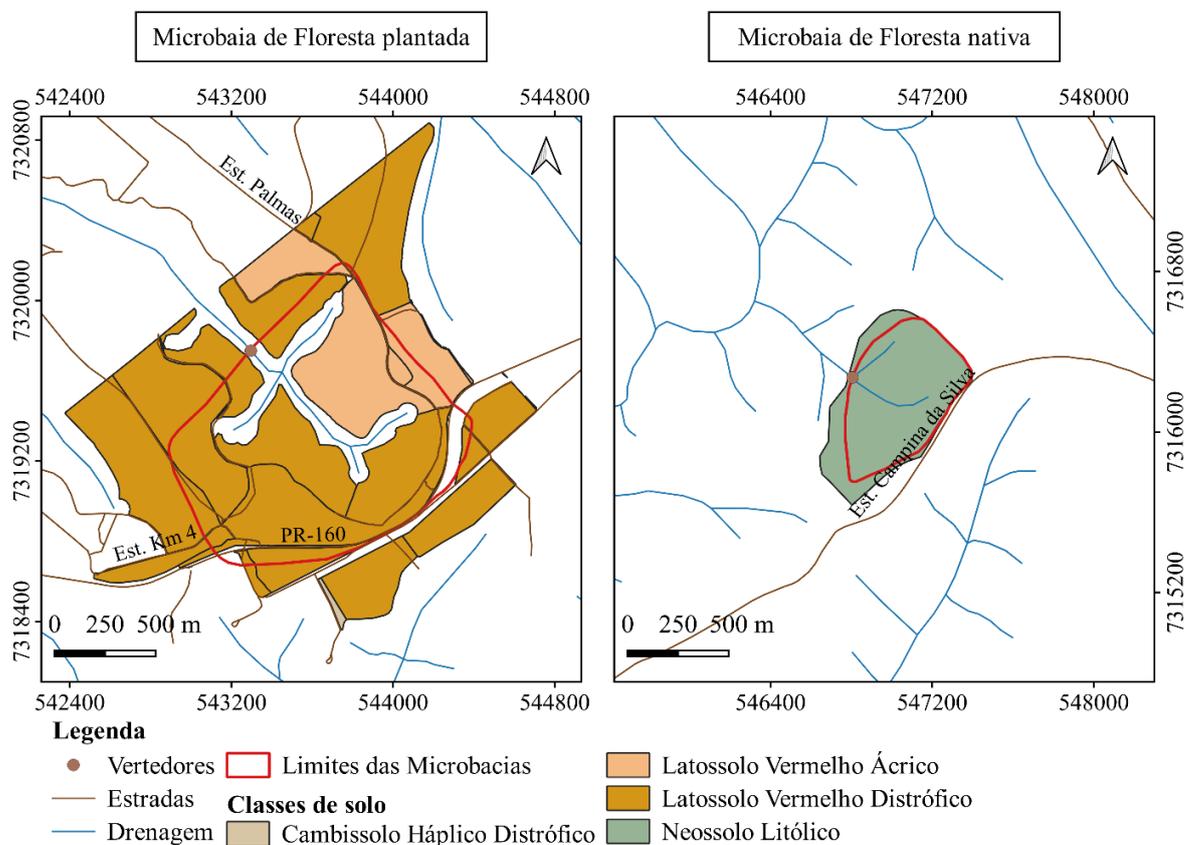
Fonte: Voigtlaender (2007, adaptado).

Quadro 3 - Características de fertilidade do solo na microbacia composta por floresta plantada.

Características de Textura	Profundida (cm)	Microbacias	
		Floresta Plantada	Floresta Nativa
M.O. (g dm ⁻³)	0 - 20	27	18
	20 - 60	18	12
	60 - 100	12	8
P (mg dm ⁻³)	0 - 20	5	5
	20 - 60	3	4
	60 - 100	3	3
K (mmolc dm ⁻³)	0 - 20	0,7	1,5
	20 - 60	0,4	1,5
	60 - 100	0,5	1,3
Ca (mmolc dm ⁻³)	0 - 20	15,6	11,7
	20 - 60	9	9,3
	60 - 100	6,3	7,8
Mg (mmolc dm ⁻³)	0 - 20	3,8	4,4
	20 - 60	2,4	7,2
	60 - 100	2,3	7,4

Fonte: Voigtlaender (2007, adaptado).

Figura 4 - Mapa de solos das Microbacias de floresta plantada e nativa, inseridas na bacia hidrográfico do Rio Tibagi, Paraná.



Fonte: elaborado pelo autor.

Para o clima, seguindo a classificação climática de Köppen a região é classificada como Cfa, zona subtropical úmida quente, com mata pluvial e acima de 500 m de altitude, mata de araucárias, geadas noturnas (0 a 3 geadas/ano), com temperatura média no mês mais frio inferior a 18°C (mesotérmico) e temperatura média no mês mais quente superior a 22°C, caracterizando verões quentes, geadas pouco frequentes e uma tendência de concentração das chuvas nos meses de verão, porém sem uma estação seca definida (Cruz, 2007).

A Tabela 1 contém um resumo das principais características das microbacias pareadas monitoradas.

Tabela 1 - Principais características das microbacias experimentais localizadas no município de Telêmaco Borba, Paraná.

Características	Flor. plantadas de Pinus	Vegetação nativa
Área da microbacia (ha)	135,7	33,9
Área com florestas plantadas (ha)	110,7 (85%)	0 (0%)
Área destinada à conservação (ha)	19,8 (15%)	33,9 (100%)
Ordem da Microbacia (Sthraler, 1957)	2ª ordem	2ª ordem
Precipitação média anual (mm)	1620	1607
Bioma	Mata Atlântica	
Ano Hídrico	Jan a Dez	

Fonte: IPEF (2024, adaptado).

4.2.2 Manejo Florestal

Uma informação relevante a ser considerada na análise comparativa entre as microbacias é que o manejo florestal não é realizado de forma uniforme em toda a área da microbacia com floresta plantada. Em vez disso, aplica-se a técnica do manejo em mosaico, amplamente adotada por empresas do setor florestal. Esse sistema consiste na disposição alternada de talhões de florestas plantadas em diferentes idades, intercalados com grandes áreas de vegetação nativa preservada. Na prática, isso significa que, mesmo em uma mesma microbacia, coexistem áreas em diferentes estágios de crescimento florestal, áreas recentemente colhidas e parcelas destinadas à conservação permanente.

Dentro da microbacia de floresta plantada, a implantação do Pinus teve início em 1964, com *Pinus elliottii* var. *elliottii* e em 1974 com *Pinus taeda*. Em 1997, o talhão (nº 88) com *Pinus elliottii* var. *elliottii* foi colhido, sendo feito plantio com *Pinus taeda* adotando-se o espaçamento de 2,5 x 3,0 m. Nos talhões de *Pinus taeda* (nº 135, 136A e 137B) foi realizada o corte raso em 2001 e plantado a mesma espécie em espaçamento 3,0 x 2,0 m. A microbacia apresentava ainda um talhão (nº 86) com pouco mais de 11 ha com Eucalyptus, o qual foi colhido em 2010, sendo substituído por florestas plantadas de Pinus. Dessa forma, a microbacia apresenta florestas plantadas de Pinus que foram

implantadas nos anos de 1997, 2001 e 2010, formando um mosaico com 3 diferentes idades.

A microbacia com vegetação nativa é localizada no parque Ecológico da Klabin que abrange a área de 11 mil ha da Fazenda Monte Alegre. A vegetação desta microbacia é caracterizada por uma transição entre Floresta Ombrófila Mista e Florestas Estacional Semidecidual, ambas do bioma Mata Atlântica. Na Tabela 2 encontram-se as principais operações florestais realizadas na microbacia com florestas plantadas (talhão 16A).

Tabela 2 - Operações florestais realizadas na microbacia com florestas plantadas (talhão 16A).

Descrição	Mês	Conclusão	Equipamentos
Limpa trilho esteira	Out/10	24/09/10	Limpa Trilho
Subsolagem com trator de esteira	Out/10	11/10/10	Subsolador
Planificação pré-preparo	Nov/10	08/11/10	Cordas e Balizas
Plantio com gel (espaçamento 3 x 2,5m)	Nov/10	09/11/10	Módulo de plantio
Coveamento manual	Dez/10	09/11/10	Picareta

Fonte: elaborado pelo autor.

Na Tabela 3 é apresentado as atividades realizadas nos talhões ACOM7A, ACON5A e ACON6A da microbacia plantada, com colhida área colhida de 50,2 ha.

Tabela 3 - Operações florestais realizadas na microbacia com florestas plantadas (ACOM7A, ACON5A e ACON6A).

Descrição	Data
Início da colheita	07/07/2023
Término da colheita	19/08/2023
Aplicação de corretivo de acidez	16/08/2023
Limpa trilho	08/09/2023
Subsolagem com trator de esteira	12/09/2023
Combate à formiga pré-plantio	03/10/2023
Adubação de base pré-plantio mecanizada	22/10/2023
Aplicação de herbicida em área total pré-emergente	20/10/2023
Combate à formiga pré-plantio	21/10/2023
Plantio de Eucalyptus urograndis 1667 árv./ha	26/10/2023
Replantio	10/11/2023
Herbicida mecanizada pós-emergente	01/12/2023
Combate à formiga	12/02/2024
Herbicida manual pós-emergente	23/02/2024
Adubação de cobertura	04/03/2024

Fonte: elaborado pelo autor.

4.2.3 Aquisição de bases de dado

Os dados foram fornecidos pelo Programa Cooperativo sobre Monitoramento e Modelagem de Bacias Hidrográficas (PROMAB), que conduz pesquisas em colaboração com a empresa responsável pela área e o Laboratório de Hidrologia Florestal (LHF) da ESALQ/USP. O PROMAB integra os programas do IPEF (Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais) e concentra-se na utilização de microbacias hidrográficas experimentais para avaliar os impactos do manejo florestal nos recursos hídricos, visando desenvolver estratégias de manejo florestal mais sustentável do ponto de vista hidrológico (IPEF, 2024).

Os parâmetros analisados foram precipitação, vazão, fósforo e nitrato. Os métodos utilizados são descritos no Quadro 4.

Quadro 4 - Determinação dos parâmetros estudados.

Parâmetro	Floresta Nativa	Floresta Plantada
Precipitação	Pluviógrafo para o registro da intensidade e quantidade de precipitação, juntamente com um sistema digital (datalogger CR510) para o armazenamento desses dados.	
Vazão	Composta por um vertedor composto (triangular truncado mais retangular de parede delgada). Para registro da lâmina no início da medição foi utilizado um equipamento de medição de nível “boia e contrapeso”, que foi substituído por um transdutor de pressão (CS451 – Campbell) (Figura 5).	Composta por um vertedor triangular de crista curta. O sensor empregado é “boia e contrapeso” para o registro contínuo da altura da lâmina d’água (Figura 5).
Fósforo	Determinado colorimetricamente, baseada na formação de compostos de cor azul (azul de molibdênio) provocada	

	<p>pela redução do ácido fosfomolibdico pelo ácido ascórbico. Método do fosfomolibdato, específico para a forma de ortofosfato. Os ortofosfatos presentes na amostra são convertidos a fosfomolibdato pela reação ácida com reagente de molibdato de amônio, que produz coloração azul.</p> <p>Equipamento: Espectrofotômetro Hitachi – mod. U2001.</p>
Nitrato	<p>Determinado pelo método Brucina. Baseia-se no fato de que o nitrato reage com a brucina (um alcaloide) em meio ácido produzindo uma solução com coloração amarela. A cor (amarela) produzida é proporcional à concentração na amostra, o que permite então, a determinação por colorimetria. Esse método pode ser aplicado para águas incolores contendo até 5,0 mg/L de nitrato.</p> <p>Equipamento: Espectrofotômetro Hitachi – mod. U2001.</p>

Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 5 - Estação linimétrica construída na microbacia com floresta plantada de Pinus (a esquerda) e na microbacia com vegetação nativa (a direita), localizadas em Telêmaco Borba, Paraná.



Fonte: IPEF (2024, adaptado).

Foram coletadas informações de precipitação e vazão diária. A concentração de fósforo total e nitrato foram medidas durante uma série histórica entre 2004 e 2024 em frequência quinzenal, ao todo foram 529 coletas para a microbacia de floresta nativa e 530 para de floresta plantada. A análise das amostras foi feita pelo Laboratório de Ecologia Aplicada (LEA) da ESALQ/USP.

4.2.4 Procedimentos metodológicos

Os valores de Fósforo total (FT) foram usados para o estudo do estado trófico. O IET, foi calculado de acordo com a Equação 1 (E1), de (Lamparelli, 2004).

$$\text{IET(PT)} = 10 * (6 - ((0,42 - 0,36 * (\ln. \text{PT}))/\ln 2)) - 20$$

(E1)

Na qual: PT é a concentração de fósforo total, em $\mu\text{g.L}^{-1}$, e ln, o logaritmo natural.

Os resultados foram comparados com os parâmetros propostos por (Lamparelli, 2004), apresentados no Quadro 5.

Quadro 5 - Classificação do Estado Trófico para rios.

Categoria (Estado Trófico)	Ponderação
Ultraoligotrófico	$\text{IET} \leq 47$
Oligotrófico	$47 < \text{IET} \leq 52$
Mesotrófico	$52 < \text{IET} \leq 59$
Eutrófico	$59 < \text{IET} \leq 63$
Supereutrófico	$63 < \text{IET} \leq 67$
Hipereutrófico	$\text{IET} > 67$

Fonte: Lamparelli (2004).

4.2.5 Análises estatísticas

Como os dados não apresentaram distribuição normal, conforme verificado pelo teste de Shapiro-Wilk, optou-se por utilizar uma abordagem alternativa aos testes de hipótese tradicionais. As médias e os intervalos de confiança ($\pm 95\%$) dos parâmetros precipitação, vazão, nitrato, fósforo e Índice de Estado Trófico (IET) foram estimados por meio do método de reamostragem aleatória, utilizando o processo de *bootstrapping* com 1000 iterações (Johnson, 2001). Essa técnica, que não depende de suposições sobre a distribuição dos dados, oferece uma forma robusta de análise estatística, útil em cenários com distribuições assimétricas ou tamanhos de amostra limitados. Dessa forma, o

bootstrapping apresenta-se como uma alternativa confiável para estimativas e comparações entre grupos em estudos ambientais.

A correlação de Spearman foi aplicada para comparar os parâmetros estudados, avaliando a força e a direção da relação monótona entre duas variáveis que estejam, no mínimo, em uma escala ordinal. Esse método considera a posição relativa das observações, em vez dos valores brutos, e pode ser utilizado tanto para dados lineares quanto não lineares (Sousa, 2019). Para a classificação da correlação de Spearman, foi adotado o critério de Rumsey (2023), conforme apresentado no Quadro 6.

Quadro 6 - Classificação da correlação de Spearman.

rs	Classificação
±1	Relação linear perfeita
±0,70	Relação linear forte
±0,50	Relação linear moderada
±0,30	Relação linear fraca
0	Ausência de relação linear

Fonte: Rumsey (2023).

Toda a análise estatística e a geração dos gráficos foram realizadas no software livre RStudio, versão 4.4.2. Para fazer as médias e os intervalos de confiança ($\pm 95\%$) foram usados os pacotes *boot* e *reshape*. Já para a correção entre as variáveis foram utilizados os pacotes *readr*, *hmisc* e *corrplot*.

4.2.6 Índice espectral para análise no uso e cobertura da terra

Os índices espectrais produzem valores numéricos que podem ser utilizados na identificação de diferentes classes de cobertura do solo, com base na correlação entre parâmetros biofísicos (Angelini, 2020). Para detectar alterações no padrão de UCT nos períodos em que houve manejo, especificamente nos anos de 2010 e 2023/2024, foi empregado o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (Normalized Difference Vegetation Index – NDVI). Esse índice representa a razão entre a diferença de refletância na banda do infravermelho próximo (ρ_{NIR}) e na banda do vermelho (ρ_{Red}) pela soma (Rouse *et al.*, 1974), conforme expressa a Equação 2 (E2).

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}} \quad (E2)$$

Para a construção do NDVI, foram utilizadas imagens dos satélites Landsat 5, do sensor Thematic Mapper (TM), e Landsat 8, dos sensores Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor (OLI/TIRS), ambas pertencentes à Coleção 2. As imagens possuem resolução espacial de 30 metros e são geradas pela National Aeronautics and Space Administration (NASA) e disponibilizadas pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) (USGS, 2025). As datas de aquisição das imagens concentraram-se nos meses de junho, julho e agosto, selecionadas conforme a melhor disponibilidade de cenas com ausência de cobertura de nuvens, visando garantir a qualidade da análise.

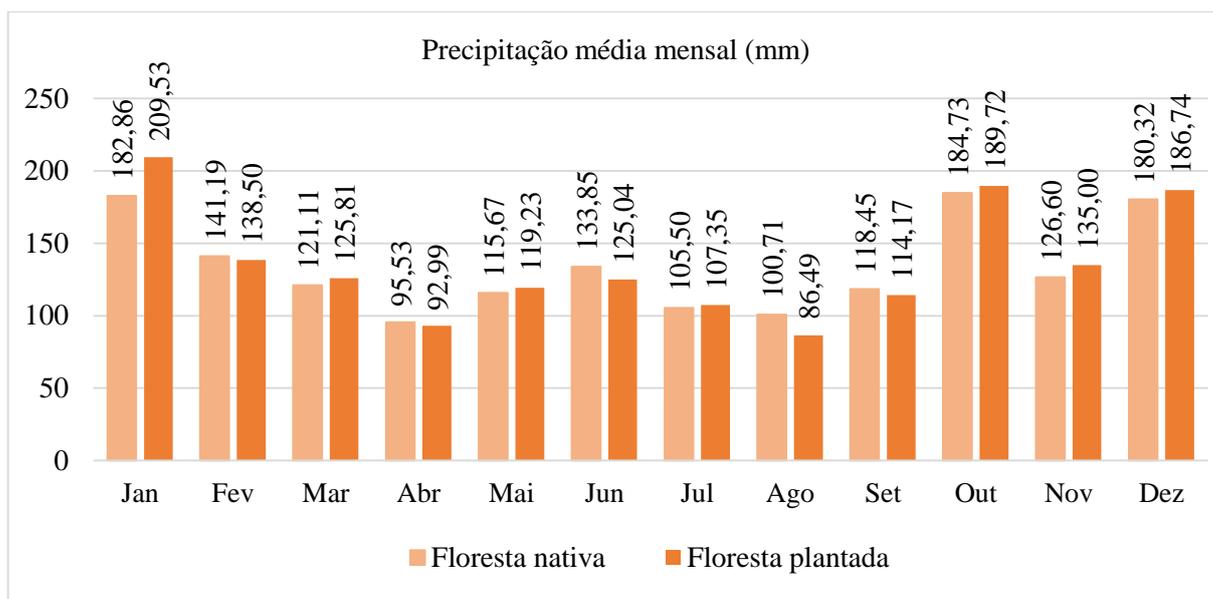
O processamento das imagens foi feito com o auxílio do software livre QGIS 3.16.9/Hannover.

4.3 Resultados

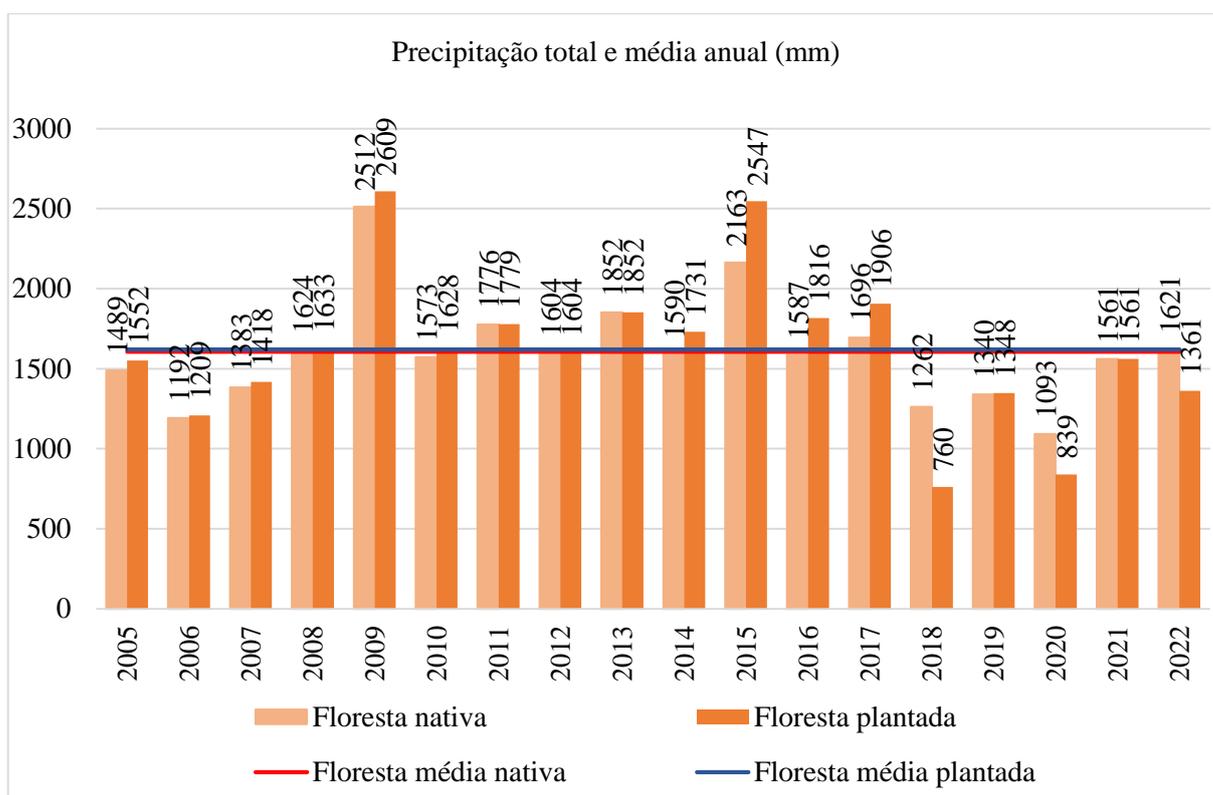
4.3.1 Análise espaço-temporal da precipitação nas microbacias hidrográficas

Nas Figuras 6 e 7 são apresentados os dados de precipitação média mensal e total anual da área de estudo, respectivamente. De modo geral, observa-se uma distribuição sazonal semelhante entre as microbacias de floresta nativa e plantada, com os maiores volumes médios mensais de precipitação ocorrendo em janeiro, outubro e dezembro, e os menores em abril e agosto. Apesar das variações mensais, não foram observadas diferenças significativas entre as médias mensais das duas áreas. A maior diferença entre os valores médios mensais ocorreu nos meses de janeiro e agosto, com diferenças de aproximadamente 26,67 mm e 14,22 mm, respectivamente, representando uma variação relativa inferior a 15%.

Na análise anual, nota-se que os valores de precipitação total variaram consideravelmente ao longo dos anos em ambas as áreas. As maiores precipitações foram registradas em 2009 e 2015, enquanto os menores volumes ocorreram entre 2018 e 2020. Ainda assim, as médias anuais entre as duas áreas foram bastante próximas, indicando distribuição pluviométrica geral semelhante entre as microbacias de floresta nativa e plantada.

Figura 6 - Média mensal de precipitação (mm) para a área de estudo.

Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 7 - Precipitação total e média anual (mm) para a área de estudo.

Fonte: elaborado pelo autor.

Não houve diferença significativa entre as áreas de estudo para os meses do ano, visto que os intervalos de confiança dos valores médios mensais sobrepuseram em todos

os meses (Tabela 4). Considerando o acumulado anual das médias mensais, a floresta plantada apresentou o total de 1646,15 mm, enquanto a floresta nativa somou 1623,14 mm. Isso representa uma diferença de aproximadamente 1,42% a mais na floresta plantada. Apesar dessa diferença, os valores são bastante próximos, reforçando a ausência de diferença significativa já observada nas comparações mensais.

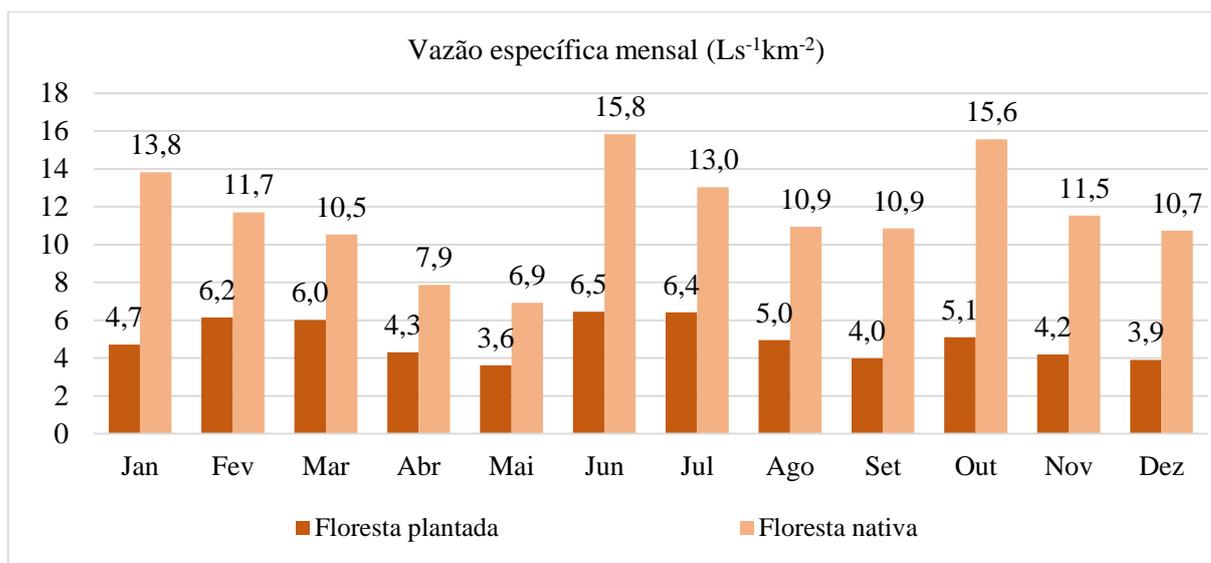
Tabela 4 - Precipitação média mensal com a aplicação do intervalo de confiança de $\pm 95\%$ para as microbacias de floresta nativa e plantada.

Mês/microbacia	Floresta Nativa	Floresta Plantada
Janeiro	182,54 \pm 40,03	208,4 \pm 40,31
Fevereiro	143,45 \pm 37,06	137,61 \pm 36,59
Março	121,78 \pm 30,09	125,96 \pm 28,42
Abril	98,52 \pm 28,23	94,21 \pm 35,1
Maio	115,13 \pm 28,37	119,22 \pm 31,92
Junho	134,43 \pm 41,26	127,76 \pm 44,72
Julho	108,54 \pm 49,36	111,18 \pm 45,91
Agosto	105,14 \pm 40,1	89,06 \pm 34,96
Setembro	122,55 \pm 42,49	116,25 \pm 33,77
Outubro	184,27 \pm 59,16	192,29 \pm 52,97
Novembro	128,61 \pm 27,88	139,22 \pm 40,77
Dezembro	178,18 \pm 39,12	184,99 \pm 41,42

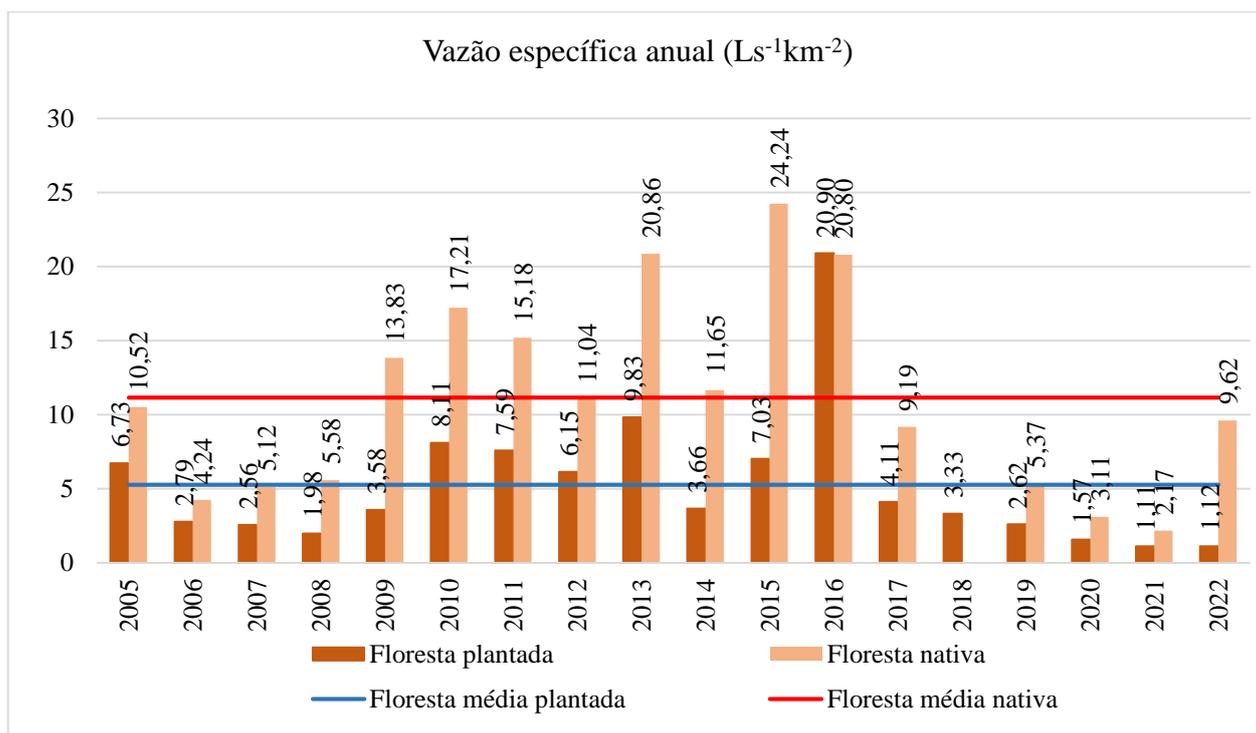
Fonte: elaborado pelo autor. *: valores estatisticamente diferentes.

4.3.2 Análise espaço-temporal da vazão nas microbacias hidrográficas

A Figura 8 apresenta os valores mensais de vazão específica (em $\text{L s}^{-1}\text{km}^{-2}$). Em todos os meses observados, a microbacia de floresta nativa apresentou vazões específicas superiores às da floresta plantada. Na Figura 9 é apresentado os dados anuais, a microbacia de floresta nativa apresentara valores maiores e mais estáveis, enquanto as plantadas mostraram maior variabilidade. O pico de vazão microbacia de floresta plantada ocorreu em 2016, enquanto na nativa houve destaque em 2015.

Figura 8 - Vazão média mensal para a área de estudo.

Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 9 - Vazão média anual para a área de estudo.

Fonte: elaborado pelo autor.

Ao comparar os intervalos de confiança de 95%, constatou-se diferença estatisticamente significativa entre as microbacias nos meses de agosto, setembro, outubro e dezembro (Tabela 5). Considerando o acumulado anual das médias mensais de vazão, a microbacia com floresta nativa apresentou o total de $147,14 \text{ Ls}^{-1}\text{km}^{-2}$, enquanto

a floresta plantada registrou apenas $62,88 \text{ Ls}^{-1}\text{km}^{-2}$. Essa diferença corresponde a redução de aproximadamente 57,27% na vazão da área com floresta plantada em relação à nativa.

Tabela 5 - Vazão média mensal ($\text{Ls}^{-1}\text{km}^{-2}$) com a aplicação do intervalo de confiança de $\pm 95\%$ para as microbacias de floresta nativa e plantada.

Mês/microbacia	Floresta Nativa	Floresta Plantada
Janeiro	$14,82 \pm 7,57$	$4,89 \pm 2,5$
Fevereiro	$11,54 \pm 5,09$	$6,94 \pm 4,31$
Março	$9,73 \pm 4,59$	$6,93 \pm 4,44$
Abril	$8,12 \pm 3,01$	$4,85 \pm 2,66$
Maio	$6,71 \pm 2,30$	$3,83 \pm 1,52$
Junho	$22,84 \pm 15,03$	$6,72 \pm 3,48$
Julho	$13,67 \pm 7,27$	$6,53 \pm 3,16$
Agosto	$10,8 \pm 3,72^*$	$4,83 \pm 1,9^*$
Setembro	$10,68 \pm 4,2^*$	$3,97 \pm 1,41^*$
Outubro	$15,11 \pm 5,78^*$	$5,02 \pm 1,93^*$
Novembro	$12,54 \pm 6,5$	$4,71 \pm 2,25$
Dezembro	$11,48 \pm 5,43^*$	$3,66 \pm 1,24^*$

Fonte: elaborado pelo autor. *: valores estatisticamente diferentes.

Os maiores valores médios de vazão anual foram observados nos anos de 2013, 2015 e 2016 em ambas as microbacias, com destaque para os volumes mais elevados registrados na microbacia de floresta nativa. Os menores valores médios de vazão ocorreram nos anos de 2020 e 2021. A comparação dos intervalos de confiança de 95% revelou diferença estatisticamente significativa entre as microbacias na maior parte dos anos analisados, com exceção de 2016, em que os valores médios de vazão foram estatisticamente semelhantes (Tabela 6).

Tabela 6 - Vazão média diária ($Ls^{-1}km^{-2}$) com a aplicação do intervalo de confiança de $\pm 95\%$ para as microbacias de floresta nativa e plantada.

Mês/microbacia	Floresta Nativa	Floresta Plantada
2005	10,9 \pm 2,08*	6,67 \pm 0,73*
2006	4,28 \pm 0,47*	2,88 \pm 0,26*
2007	5,17 \pm 0,63*	2,58 \pm 0,27*
2008	5,63 \pm 0,85*	1,98 \pm 0,29*
2009	13,94 \pm 1,98*	3,6 \pm 0,52*
2010	17,8 \pm 3,1*	8,3 \pm 1,25*
2011	15,28 \pm 1,11*	7,65 \pm 0,49*
2012	11,14 \pm 1,32*	6,19 \pm 0,53*
2013	21,17 \pm 3,07*	9,87 \pm 1,23*
2014	11,94 \pm 1,71*	3,71 \pm 0,45*
2015	24,29 \pm 2,44*	7 \pm 0,77*
2016	20,85 \pm 1,69	20,86 \pm 1,37
2017	9,45 \pm 1,68*	4,24 \pm 0,53*
2018		3,35 \pm 0,27
2019	5,63 \pm 2,51*	2,59 \pm 0,27*
2020	3,2 \pm 0,91*	1,61 \pm 0,19*
2021	2,17 \pm 0,76*	1,12 \pm 0,20*
2022	8,78 \pm 2*	1,15 \pm 0,24*

Fonte: elaborado pelo autor. *: valores estatisticamente diferentes.

4.3.3 Análise espaço-temporal da concentração de nitrato e fósforo nas microbacias hidrográficas

As Tabelas 7 e 8 apresentam os dados de estatística descritiva para os parâmetros de nitrato e fósforo. De modo geral, as microbacias mostraram valores próximos, com diferença de 0,09 $mg \cdot L^{-1}$ para o nitrato, sendo a microbacia com floresta plantada a que apresentou maior concentração, e de 0,004 $mg \cdot L^{-1}$ para o fósforo, com valores mais elevados na microbacia de floresta nativa. Para o nitrato, a análise dos intervalos de confiança de 95% indicou diferenças significativas entre as microbacias nos anos de 2006, 2008, 2009, 2015, 2016, 2020, 2023 e 2024. Em especial, nos períodos de 2015–2016 e 2023–2024, os valores registrados na microbacia plantada foram superiores aos da microbacia nativa (Tabela 9). Quanto ao fósforo, observaram-se diferenças estatisticamente significativas em três anos: 2005, 2014 e 2021, em todos esses casos, a microbacia com floresta nativa apresentou concentrações superiores as da microbacia com floresta plantada (Tabela 9). Considerando todos os anos avaliados (2004 a 2024), a concentração média de fósforo foi, em média, 23,76% maior na microbacia com floresta nativa em comparação à microbacia com floresta plantada.

Tabela 7 - Estatística básica para os valores de nitrato para as microbacias de floresta plantada e nativa.

Microbacia hidrográfica	Média	Máximo	Mínimo	Desvio Padrão
Floresta Nativa	1,45	6,15	0,2	0,88
Floresta Plantada	1,54	8,13	0,2	1,15

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 8 - Estatística básica para os valores de fósforo para as Microbacias de floresta plantada e nativa.

Microbacia hidrográfica	Média	Máximo	Mínimo	Desvio Padrão
Floresta Nativa	0,03	0,1	0,002	0,016
Floresta Plantada	0,026	0,28	0,001	0,023

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 9 - Média anual (intervalo de confiança de $\pm 95\%$) de nitrato e fósforo para as microbacias de floresta nativa e plantada.

Ano	Nitrato		Fósforo	
	Floresta Nativa	Floresta Plantada	Floresta Nativa	Floresta Plantada
2004	1,38 \pm 0,512	1,44 \pm 0,485	0,039 \pm 0,008	0,075 \pm 0,05
2005	1,24 \pm 0,19	1 \pm 0,225	0,055 \pm 0,006*	0,038 \pm 0,004*
2006	1,3 \pm 0,29*	0,79 \pm 0,119*	0,043 \pm 0,006	0,033 \pm 0,005
2007	1,37 \pm 0,3	1,16 \pm 0,33	0,047 \pm 0,007	0,038 \pm 0,012
2008	2,27 \pm 0,98*	0,9 \pm 0,33*	0,041 \pm 0,007	0,043 \pm 0,017
2009	1,68 \pm 0,3*	1,02 \pm 0,17*	0,034 \pm 0,004	0,032 \pm 0,006
2010	1,34 \pm 0,36	1,19 \pm 0,19	0,023 \pm 0,005	0,020 \pm 0,004
2011	1,23 \pm 0,23	1,22 \pm 0,19	0,020 \pm 0,004	0,014 \pm 0,004
2012	1,12 \pm 0,26	0,83 \pm 0,11	0,026 \pm 0,005	0,018 \pm 0,005
2013	0,94 \pm 0,18	1,35 \pm 0,31	0,018 \pm 0,002	0,014 \pm 0,003
2014	1,85 \pm 0,27	1,49 \pm 0,36	0,019 \pm 0,003*	0,012 \pm 0,002*
2015	2,26 \pm 0,55*	3,76 \pm 0,3*	0,019 \pm 0,005	0,012 \pm 0,003
2016	1,92 \pm 0,31*	3,25 \pm 0,57*	0,015 \pm 0,002	0,014 \pm 0,005
2017	1,36 \pm 0,19	1,29 \pm 0,17	0,024 \pm 0,005	0,016 \pm 0,003
2018	1,52 \pm 0,41	1,71 \pm 0,29	0,018 \pm 0,004	0,016 \pm 0,004
2019	1,67 \pm 0,25	1,59 \pm 0,16	0,030 \pm 0,004	0,024 \pm 0,003
2020	2,31 \pm 0,58*	1,3 \pm 0,25*	0,045 \pm 0,005	0,038 \pm 0,005
2021	1,59 \pm 0,26	1,74 \pm 0,37	0,038 \pm 0,003*	0,030 \pm 0,004*
2022	1,57 \pm 0,21	1,95 \pm 0,37	0,046 \pm 0,005	0,048 \pm 0,009
2023	0,79 \pm 0,09*	1,71 \pm 0,53*	0,031 \pm 0,004	0,030 \pm 0,007
2024	0,47 \pm 0,087*	0,78 \pm 0,132*	0,024 \pm 0,010	0,015 \pm 0,009

Fonte: elaborado pelo autor. *: valores estatisticamente diferentes.

4.3.4 Análise espaço-temporal do IET nas microbacias hidrográficas

Os maiores valores médios do IET foram observados nos anos de 2004, 2005 e 2022 para ambas as microbacias, já os menores resultados médios ocorreram entre os anos de 2015 e 2016 em ambas as áreas de estudo. Em relação à média geral do período analisado (2004 a 2024), a microbacia com floresta nativa apresentou valor ligeiramente superior (50,9) em comparação à microbacia com floresta plantada (49,5), conforme demonstrado na Tabela 10. Seguindo a classificação de Lamparelli (2004) a microbacia hidrográfica de floresta nativa obteve o índice de ultraoligotrófico até mesotrófico, já a de florestada plantada a variação foi de ultraoligotrófico até supereutrófico. A análise do intervalo de confiança de 95% revelou diferenças estatisticamente significativas entre as microbacias nos anos de 2005, 2012, 2013, 2014 e 2021, com a microbacia nativa sempre apresentando valores superiores (Tabela 11).

Tabela 10 - Estatística básica para as Microbacias de floresta plantada e nativa, inseridas na bacia hidrográfica do Rio Tibagi, Paraná.

Microbacia hidrográfica	Média	Máximo	Mínimo	Desvio Padrão
Floresta Nativa	50,9	57,85	37,5	3,01
Floresta Plantada	49,5	63,2	33,9	3,72

Fonte: elaborado pelo autor.

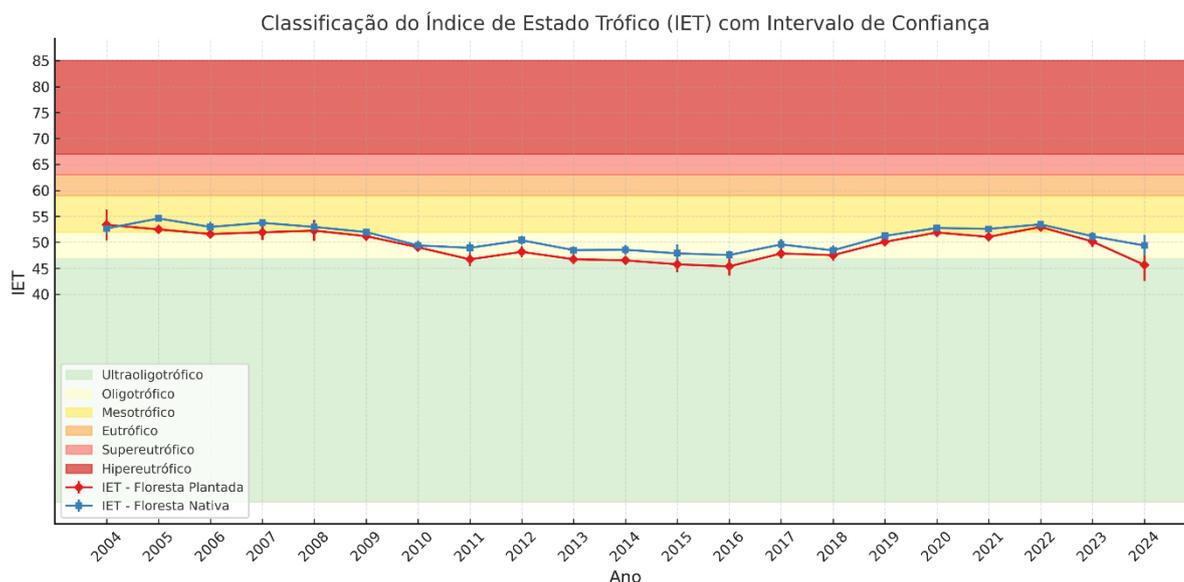
Tabela 11 - Média anual (intervalo de confiança de $\pm 95\%$) de Índice de Estado trófico (IET) para as microbacias de floresta nativa e plantada.

Ano	Floresta Nativa	Floresta Plantada
2004	52,67 \pm 1,115	53,36 \pm 3
2005	54,59 \pm 0,495*	52,49 \pm 0,765*
2006	52,97 \pm 0,96	51,6 \pm 0,825
2007	53,76 \pm 0,735	51,92 \pm 1,46
2008	52,96 \pm 0,975	52,25 \pm 2,03
2009	51,98 \pm 0,695	51,19 \pm 0,955
2010	49,40 \pm 0,95	49,05 \pm 0,83
2011	48,94 \pm 1,07	46,72 \pm 1,37
2012	50,39 \pm 0,91*	48,16 \pm 1,09*
2013	48,5 \pm 0,71*	46,74 \pm 0,94*
2014	48,56 \pm 0,98*	46,52 \pm 0,73*
2015	47,87 \pm 1,68	45,76 \pm 1,48
2016	47,54 \pm 0,83	45,37 \pm 1,77
2017	49,59 \pm 1,04	47,85 \pm 0,98
2018	48,45 \pm 0,94	47,52 \pm 1,03
2019	51,23 \pm 0,6	50,09 \pm 0,82
2020	52,76 \pm 0,46	51,88 \pm 0,55
2021	52,58 \pm 0,48*	51,06 \pm 0,66*
2022	53,46 \pm 0,56	52,95 \pm 0,82
2023	51,16 \pm 0,78	50,15 \pm 1,07
2024	49,39 \pm 2,01	45,65 \pm 3,06

Fonte: elaborado pelo autor. *: valores estatisticamente diferentes.

Na Figura 10 é apresentada a evolução do IET para duas microbacias, considerando as médias dos anos. De modo geral, observa-se que os valores de IET para ambas as microbacias mantiveram-se relativamente estáveis ao longo do tempo, situando predominantemente na faixa de estado oligotrófico a mesotrófico, indicando condições de baixa a moderada eutrofização.

Figura 10 - Classificação do índice de estado trófico com a aplicação do intervalo de confiança de $\pm 95\%$ para as microbacias de floresta nativa e plantada.



A análise sazonal do IET revelou que os maiores resultados foram observados no período chuvoso para ambas as microbacias. A diferença entre o período seco e chuvoso foi mais evidente nos anos de 2005, 2006, 2008, 2012, 2014 e 2021, quando houve distinções estatisticamente significativas entre as microbacias (Tabela 12). Em todos esses casos, a microbacia com floresta nativa apresentou valores de IET superiores aos da plantada.

Tabela 12 - Média das estações seca e chuvosa (intervalo de confiança de $\pm 95\%$) de Índice de Estado trófico (IET) para as microbacias de floresta nativa e plantada.

Ano	Floresta Nativa		Floresta Plantada	
	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco
2004	52,97 \pm 1,06	52,48 \pm 1,78	54,25 \pm 4,33	51,3 \pm 1,8
2005	54,19 \pm 0,48*	54,88 \pm 0,85*	52,22 \pm 0,78*	52,61 \pm 1,24*
2006	54,35 \pm 0,805*	51,63 \pm 1,17	52,65 \pm 0,88*	50,61 \pm 1
2007	54,16 \pm 1,65	53,35 \pm 0,25	52,54 \pm 2,14	51,93 \pm 1,83
2008	53,57 \pm 0,465*	52,54 \pm 1,76	52,51 \pm 0,59*	51,91 \pm 3,85
2009	51,84 \pm 1,11	52,12 \pm 0,77	51,03 \pm 1,6	51,43 \pm 1,06
2010	50,33 \pm 1,14	47,9 \pm 1,2	49,47 \pm 1,04	48,1 \pm 1
2011	49,7 \pm 1,57	48,43 \pm 1,28	47,85 \pm 1,04	45,84 \pm 1,94
2012	50,66 \pm 0,72*	50,15 \pm 1,4	48,71 \pm 0,79*	47,73 \pm 1,72
2013	49,84 \pm 0,76	47,41 \pm 0,79	48,28 \pm 1,21	45,57 \pm 1,29
2014	48,23 \pm 1,58	48,86 \pm 0,91*	46,81 \pm 1,08	46,17 \pm 0,9*

2015	49,33±1,9	46,13±2,72	47,22±1,81	43,75±1,59
2016	48,33±1,08	46,59±0,99	47,12±0,65	43,62±3,36
2017	48,87±1,21	49,99±1,69	47,19±1,34	48,25±1,47
2018	49,57±1,25	46,98±0,9	48,16±1,71	46,66±0,8
2019	51,82±0,52	50,66±1	50,67±0,79	49,5±1,43
2020	53,9±0,45	51,78±0,44	52,9±0,59	51,12±0,66
2021	53,15±0,65	52,12±0,56*	52,21±0,66	50,13±1,05*
2022	53,41±0,92	53,46±0,58	52,45±1,2	53,52±1,11
2023	51,18±1,15	51,16±1,07	48,68±1,54	51,05±1,39

Fonte: elaborado pelo autor. *: valores estatisticamente diferentes.

4.3.5 Análise dos efeitos dos sistemas de manejo nos parâmetros nitrato, fósforo e IET nas microbacias hidrográficas

Para avaliar os efeitos do uso de UCT sobre a qualidade da água, foram comparados os períodos pré (2008–2009), durante (2010) e pós-manejo (2011–2012) nas microbacias estudadas (Tabela 13). Observou-se redução progressiva nos valores médios do Índice de Estado Trófico (IET) e das concentrações de fósforo ao longo dos períodos, tanto na microbacia com floresta nativa quanto na plantada, com diferenças estatisticamente significativas entre elas. O IET apresentou redução de 4,95% na microbacia nativa e de 7,8% na plantada entre os períodos pré e pós-manejo. Para o fósforo, a queda foi de 36,11% na nativa e de 52,94% na plantada. Quanto ao nitrato, houve diminuição de 37,43% na microbacia nativa, com diferença estatística significativa, enquanto na plantada os valores mantiveram-se relativamente estáveis, sem diferença significativa entre os períodos.

No segundo ciclo de manejo, a comparação foi realizada entre os períodos anterior e durante o manejo (Tabela 14). Assim como no primeiro ciclo, os valores médios de IET e fósforo diminuíram em ambas as microbacias durante o período de manejo, com diferenças estatisticamente significativas. O IET reduziu 4,10% na microbacia nativa e 5,28% na plantada, enquanto o fósforo caiu 25% na nativa e 30,77% na plantada. O nitrato também apresentou queda nos dois casos: redução de 53,08% na microbacia nativa, com diferença estatística significativa, e de 14,84% na plantada, sem diferença significativa entre os períodos.

Tabela 13 - Média do pré, durante e pós-primeiro período de manejo (intervalo de confiança de $\pm 95\%$) de Índice de Estado trófico (IET), fósforo e nitrato para as microbacias de floresta nativa e plantada, com comparação entre as mesmas microbacias.

Variável	Nativa	Plantada	Nativa	Plantada	Nativa	Plantada
	2008 a 2009		2010		2011 a 2012	
IET	52,27 \pm 0,56 *	51,47 \pm 0,84 *	49,40 \pm 0,95 *	49,05 \pm 0,83 *	49,68 \pm 0,73 *	47,45 \pm 0,87 *
Fósforo	0,036 \pm 0,004*	0,034 \pm 0,007*	0,023 \pm 0,005*	0,020 \pm 0,004*	0,023 \pm 0,003*	0,016 \pm 0,003*
Nitrato	1,87 \pm 0,345 *	0,98 \pm 0,158	1,34 \pm 0,36	1,19 \pm 0,19	1,17 \pm 0,178 *	1,01 \pm 0,118

Fonte: elaborado pelo autor. *: valores estatisticamente diferentes.

Tabela 14 - Média do pré e durante o segundo período de manejo (intervalo de confiança de $\pm 95\%$) de Índice de Estado trófico (IET), fósforo e nitrato para as microbacias de floresta nativa e plantada, com comparação entre as mesmas microbacias.

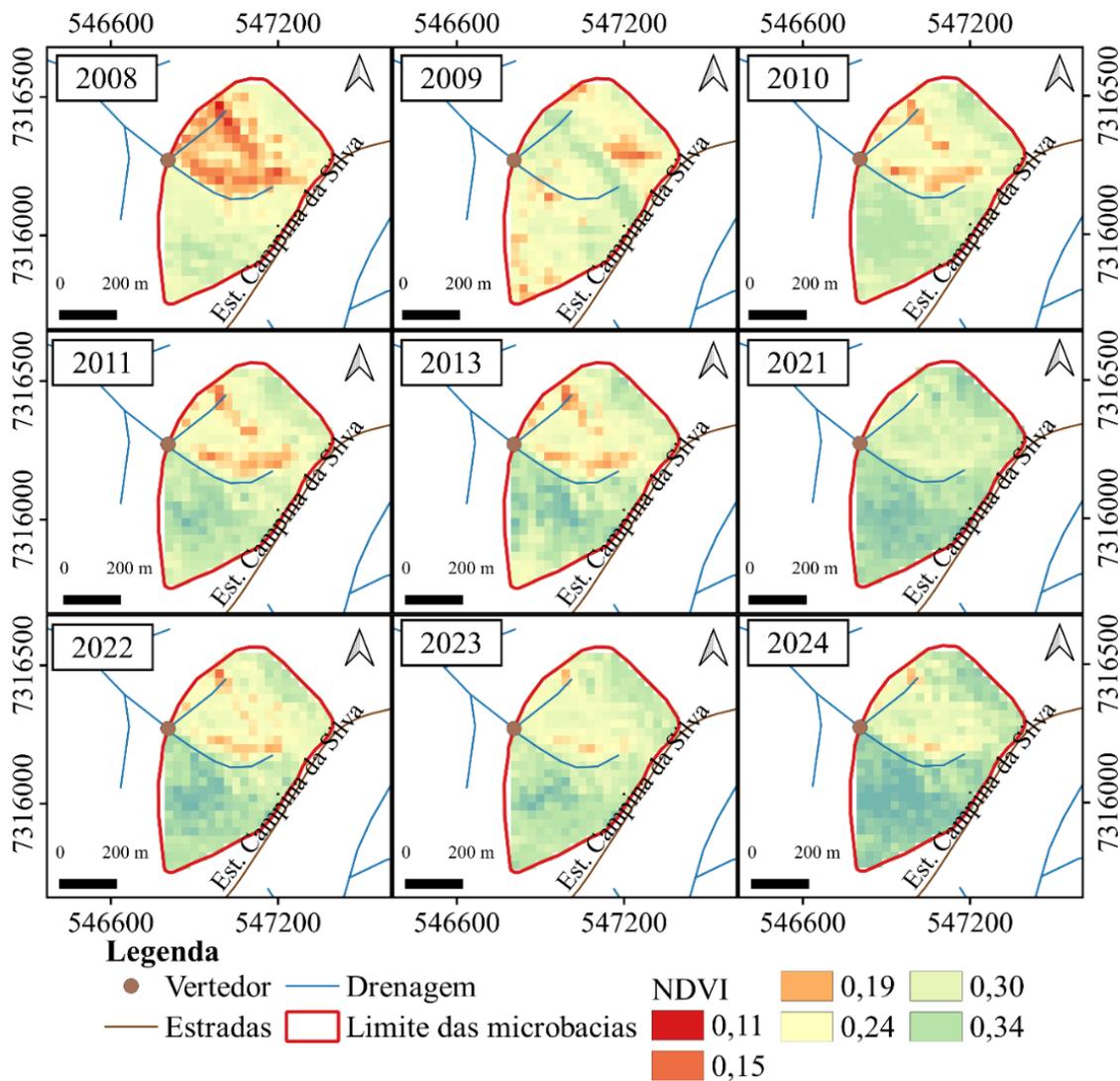
Variável	Nativa	Plantada	Nativa	Plantada
	2021 a 2022		2023 e 2024	
IET	53,06 \pm 0,38*	52,06 \pm 0,57*	50,88 \pm 0,72*	49,31 \pm 1,14*
Fósforo	0,04 \pm 0,003*	0,039 \pm 0,005*	0,03 \pm 0,004*	0,027 \pm 0,006*
Nitrato	1,56 \pm 0,17*	1,82 \pm 0,27	0,732 \pm 0,08*	1,55 \pm 0,44

Fonte: elaborado pelo autor. *: valores estatisticamente diferentes.

4.3.6 Análise espacial das microbacias hidrográficas

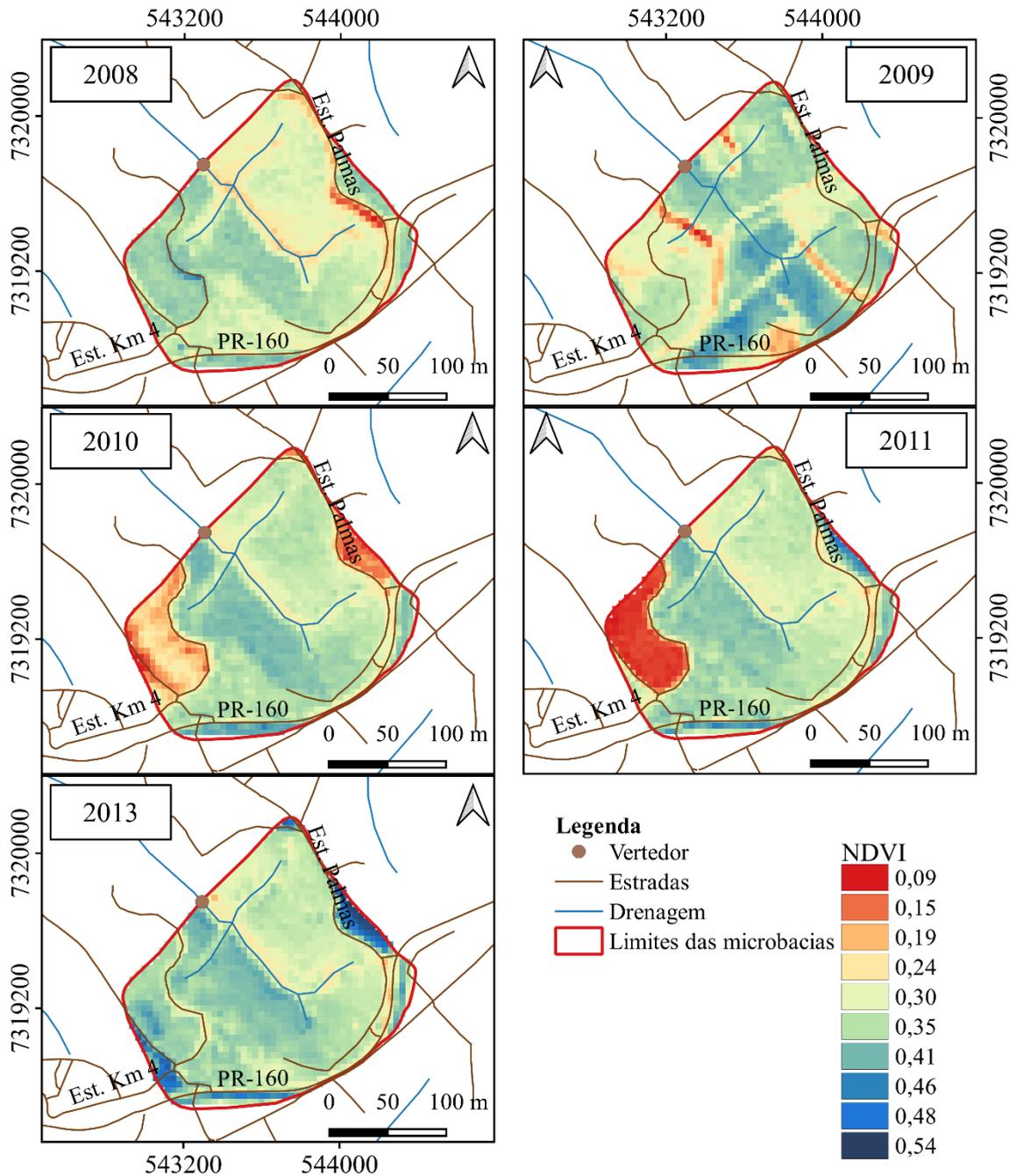
As Figuras 11, 12 e 13 apresentam a distribuição espacial do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) nas microbacias de floresta nativa (Figura 11) e de floresta plantada (Figuras 12 e 13) ao longo dos anos pré, durante e pós-manejo florestal. Observa-se que a microbacia nativa manteve uma cobertura vegetal relativamente estável ao longo do tempo, com predominância de altos valores de NDVI, indicando vegetação densa e contínua. Em contraste, as áreas de floresta plantada apresentaram redução significativa nos valores de NDVI nos anos de manejo, 2010, 2011 e 2023, respectivamente, refletindo os impactos do corte raso. Nos anos seguintes, nota-se a recuperação gradual dos índices. Já na Figura 14 é apresentado imagens do Google Earth da microbacia de floresta plantada nos períodos de pré e pós-manejo.

Figura 11 - Distribuição espacial do NDVI na microbacia de floresta nativa nos anos pré, durante e pós-manejo.



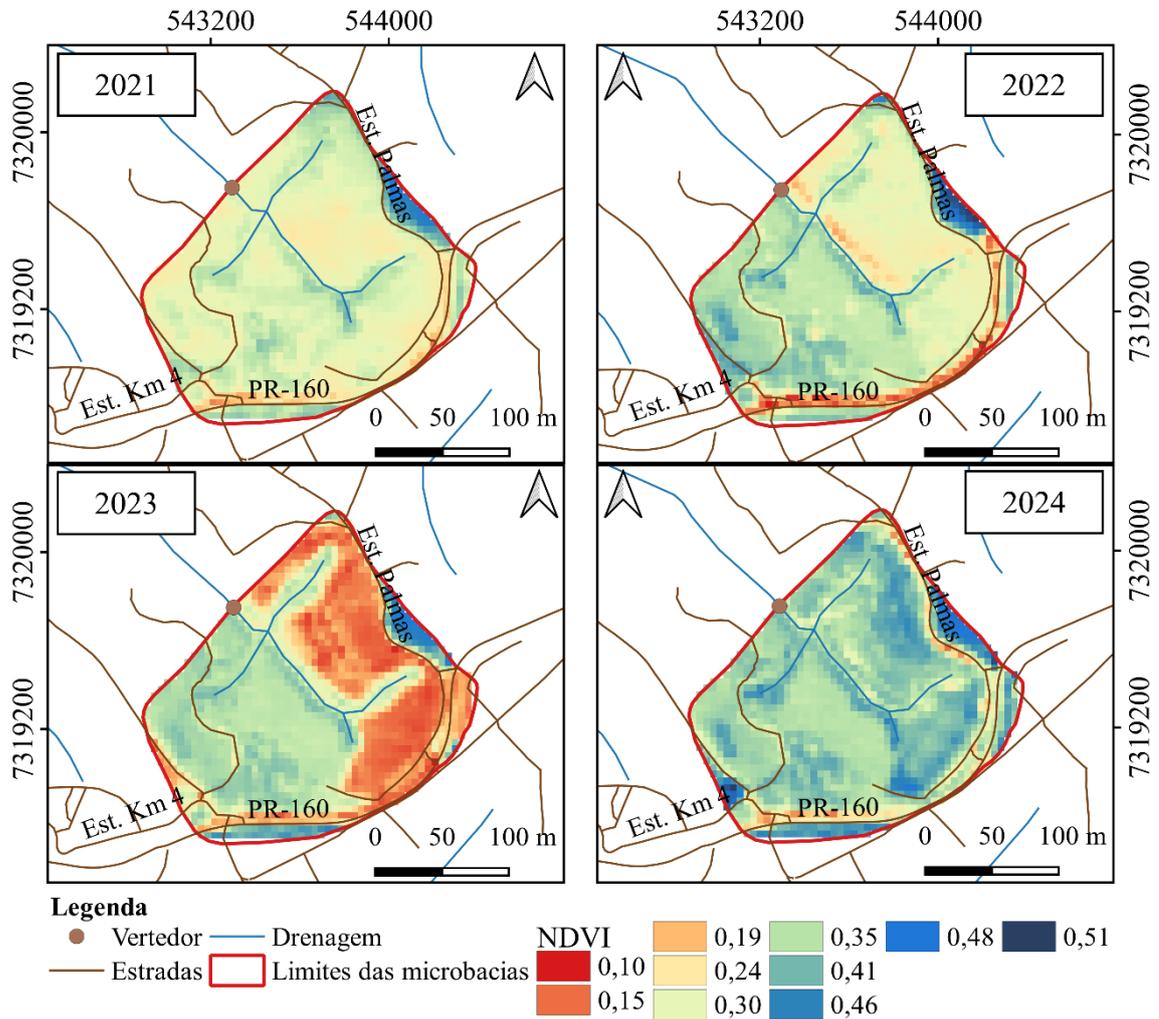
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 12 - Distribuição espacial do NDVI na microbacia de floresta plantada no primeiro período de manejo, nos anos pré, durante e pós-manejo.



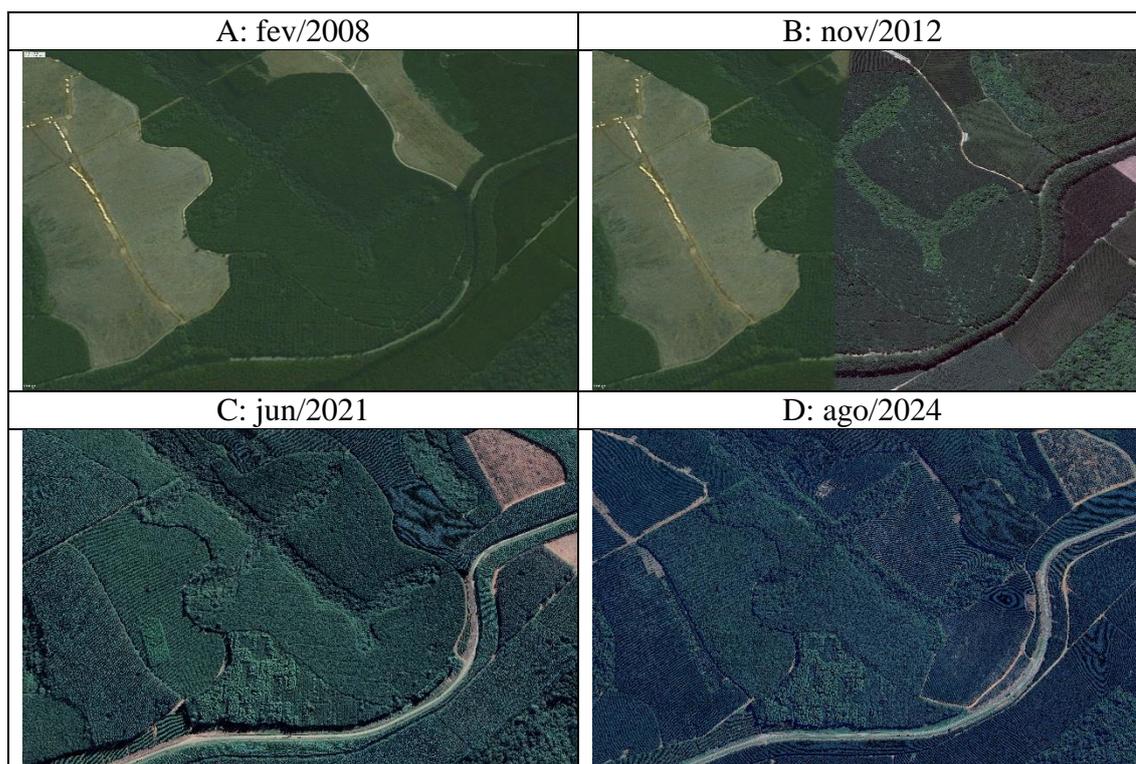
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 13 - Distribuição espacial do NDVI na microbacia de floresta plantada no segundo de manejo, nos anos pré, durante e pós-manejo.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 14 - Imagens da microbacia de floresta plantada nos anos pré e pós-manejo.



Fonte: Google Earth. Organização do autor.

4.3.7 Análise de correlação entre as variáveis estudadas nas microbacias hidrográficas

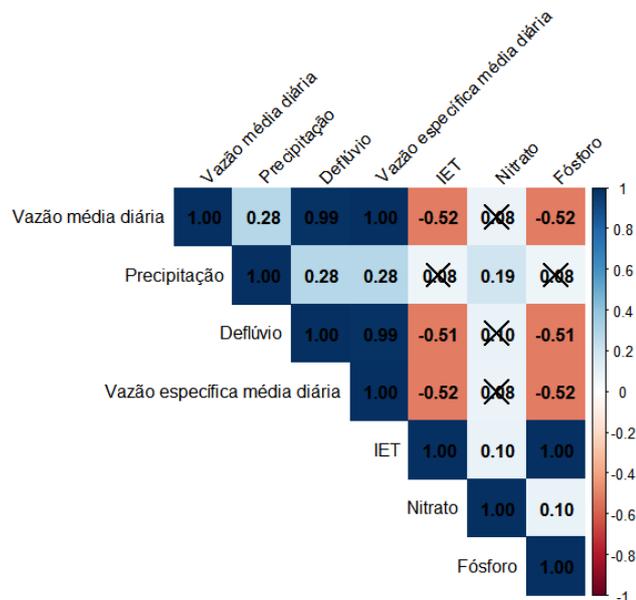
As Figuras 15 e 16 apresentam a matriz de correlação de Spearman entre as variáveis hidrológicas e de qualidade da água para as microbacias de floresta nativa e plantada, respectivamente.

Na microbacia de floresta nativa (Figura 15), foram observadas correlações perfeitas entre as variáveis vazão média diária, deflúvio e vazão específica média diária ($r = 1,00$), indicando que essas variáveis apresentam comportamento praticamente idêntico ao longo do tempo. A precipitação apresentou correlação fraca com as variáveis hidrológicas ($r = 0,28$), sugerindo influência indireta ou modulada por outros fatores. As variáveis de qualidade da água, como fósforo e IET ($r = -0,52$ com a vazão específica e média; $r = -0,51$ com a deflúvio), mostraram correlações moderadas negativas, indicando que, à medida que os volumes de água aumentam, as concentrações desses parâmetros tendem a diminuir.

Na microbacia de floresta plantada (Figura 16), o padrão de correlação entre os parâmetros hidrológicos foi semelhante, com relações perfeitas entre vazão, deflúvio e vazão específica ($r = 1,00$). A precipitação também se correlacionou de forma fraca com

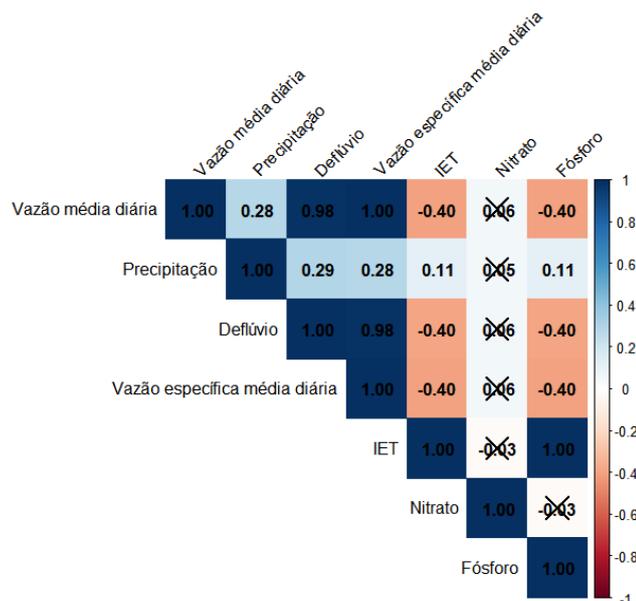
essas variáveis ($r = 0,28$ a $0,29$). Para os parâmetros de qualidade da água, as correlações com as variáveis hidrológicas foram fracas e negativas, como no caso do fósforo e IET ($r = -0,40$).

Figura 15 - Classificação da correlação de Spearman para microbacia de floresta nativa.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 16 - Classificação da correlação de Spearman para microbacia de floresta plantada.



Fonte: elaborado pelo autor.

4.4 Discussão

Um baixo valor de Significância (p-valor < 0,05) indica que a distribuição dos dados difere significativamente de uma distribuição Normal (Lopes, Castelo Branco e Soares, 2013). O valor encontrado para o estudo foi de $5,23 \times 10^{-12}$, com isso deve-se rejeitar a hipótese de Normalidade H_0 , o que demonstra que os dados configuram uma distribuição não normal.

A precipitação distribuiu-se ao longo do ano, com os meses mais chuvosos concentrados entre outubro e março. Não foram observadas diferenças significativas entre as áreas de estudo em nenhum mês, uma vez que os intervalos de confiança das médias mensais se sobrepuseram. As precipitações anuais totais apresentaram variações próximas a média, sendo 2009 e 2015 os anos mais chuvosos, enquanto 2018 e 2020 registraram os menores volumes de precipitação.

A partir da análise dos dados médios anuais de precipitação, foi possível identificar os anos de 2015 e 2016 como os mais chuvosos do período analisado. Em contraste, o intervalo de 2018 a 2022 apresentou valores significativamente reduzidos, configurando um período de cinco anos consecutivos de estiagem. Essa oscilação evidencia variações climáticas relevantes, com impacto direto na disponibilidade hídrica e na dinâmica dos ecossistemas locais.

Em relação à vazão, a microbacia de floresta nativa apresentou a média anual maior, com valor de $11,15 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$, enquanto a microbacia plantada registrou $5,26 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$. A comparação dos intervalos de confiança de 95% indicou diferença estatisticamente significativa entre as microbacias na maioria dos anos analisados, exceto em 2016, quando os valores médios de vazão mostraram-se estatisticamente semelhantes.

Para a análise anual, a floresta nativa teve o pico mais elevado de vazão em 2015, com a média de $24,29 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$, seguido por 2013 (21,17) e 2016 (20,85). Já para a floresta plantada, o ano de 2016 destacou-se com média de $20,86 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$, quase empatando com a nativa, seguido por 2013 (9,87) e 2010 (8,3). Segundo Montanher *et al.* (2023), o episódio El Niño entre setembro de 2015 e fevereiro de 2016 ocasionou chuvas abundantes no estado do Paraná, o que pode ter influenciado esses picos de vazão, tanto para as áreas de floresta nativa quanto plantada.

Para o parâmetro nitrato, a análise do intervalo de confiança de 95% revelou diferenças significativas entre as microbacias nos anos de 2006, 2008, 2009, 2015, 2016, 2020, 2023 e 2024. Nos períodos de 2015-2016 e 2023-2024, os valores da microbacia plantada foram superiores aos da microbacia nativa.

Os anos de 2015 e 2016 apresentaram as maiores médias para a microbacia plantada, acompanhadas de valores elevados também na microbacia nativa. Esses resultados podem estar relacionados a eventos climáticos extremos registrados nesses anos. Montanher *et al.* (2023) relataram que, entre setembro de 2015 e fevereiro de 2016, chuvas volumosas e consecutivas levaram à saturação do solo. Nesse contexto, as precipitações extremas da primeira quinzena de janeiro de 2016, especialmente no centro-norte do Paraná, intensificaram o escoamento superficial sobre as vertentes, provocando enchentes nos cursos fluviais da região. Além das inundações, o excesso de escoamento superficial em áreas rurais contribuiu para processos erosivos significativos.

Nery e Siqueira (2020) destacaram que, nos anos de 2015 e 2016, ocorreu um evento de El Niño classificado como forte. Já nos períodos de 2006-2007 e 2009-2010, o fenômeno foi considerado de intensidade moderada. Esses períodos coincidem com anos em que ambas as microbacias apresentaram diferenças significativas no intervalo de confiança.

No período de 2023-2024, anos em que houve manejo, os valores de $1,71 \pm 0,53$ e $0,78 \pm 0,132$ foram inferiores aos registrados nos dois anos anteriores, quando não houve manejo, indicando que não ocorreu aumento do parâmetro nesse intervalo por motivos de alteração no UCT. Ressalta-se que, em 2024, os dados foram coletados em apenas dois meses, o que pode justificar a variação observada.

Em 2023, os maiores valores foram registrados no período chuvoso, com $2,17 \pm 1,01$, em comparação a $1,42 \pm 0,46$ no período seco. Essa diferença pode estar associada à precipitação e ao escoamento de compostos nitrogenados para o corpo hídrico.

Apesar dos resultados positivos, o monitoramento deve ser mantido, uma vez que grande parte dos estudos enfatiza a lixiviação de nitrato em agroecossistemas e terras agrícolas (Padilla, Gallardo e Manzano-Agugliaro, 2018). Esse processo está frequentemente relacionado ao uso de fertilizantes nitrogenados na agricultura, contribuindo para a contaminação de águas superficiais e subterrâneas. Trata-se de um fenômeno global que tem gerado crescente pressão social e política para minimizar os impactos negativos (Padilla, Gallardo e Manzano-Agugliaro, 2018).

A análise dos dados de fósforo revelou três anos com diferenças significativas entre as microbacias: 2005, 2014 e 2021. Em nenhum desses anos os valores observados na microbacia de floresta plantada foram superiores aos da microbacia de floresta nativa.

Os valores mais elevados observados na microbacia de floresta nativa, em comparação à plantada, podem estar relacionados às diferenças na textura do solo. A

microbacia com vegetação nativa apresenta maior proporção de silte, o que favorece a retenção de minerais primários e menos suscetíveis ao intemperismo.

Na microbacia de floresta plantada, os anos de 2004 (0,075 mg/L), 2008 (0,043 mg/L) e 2022 (0,048 mg/L) apresentaram médias de fósforo superiores às observadas na microbacia nativa. Em 2008 e 2022, a vazão esteve abaixo da média histórica, sugerindo possível relação com a correlação negativa entre fósforo e vazão, classificada como moderada na microbacia nativa (-0,52) e fraca na microbacia plantada (-0,40). No ano de 2008, a vazão na microbacia plantada representou aproximadamente 37,63% da média histórica, enquanto em 2022 foi ainda menor, correspondendo a apenas 21,29% da média. Para a microbacia nativa, as vazões desses mesmos anos corresponderam a 50,04% (2008) e 86,29% (2022) da média. Esses dados reforçam o comportamento inversamente proporcional entre vazão e concentração de fósforo. Vale destacar que, para o ano de 2004, não houve análise da vazão, o que limita uma avaliação mais completa desse resultado.

No estudo de Dael *et al.* (2021), os autores afirmam que, em certos casos, o aumento da velocidade do fluxo pode promover melhor troca de oxigênio entre a água e o sedimento, o que, por sua vez, limita a liberação de fósforo. Dessa forma, a liberação de P a partir do sedimento é significativamente reduzida em condições de maior velocidade de fluxo.

Durante os anos de manejo florestal, em que ocorreram cortes (Figuras 11, 12 e 2.3), a análise ano a ano (Tabela 9) não indicou diferenças significativas entre as microbacias. No entanto, ao considerar a comparação entre os dois anos anteriores, o ano de manejo e os dois anos posteriores, observou-se diferença significativa nos valores de fósforo em todos os períodos (Tabelas 13 e 14). Notavelmente, os valores diminuíram nos anos de manejo e pós-manejo, tanto na microbacia de floresta plantada quanto na nativa.

Esse resultado reforça a hipótese de que a alteração do uso em áreas de florestas plantadas não compromete diretamente a qualidade da água, uma vez que, na maioria dos anos, os valores de fósforo na microbacia plantada não superaram os da bacia micronativa, especialmente nos anos de manejo.

Para IET, ambas as microbacias apresentaram valores semelhantes, com variações entre as classes ultraoligotrófico até mesotrófico, com a microbacia de floresta plantada com resultado supereutrófico na coleta do dia 21/12/2004 e eutrófico na coleta do dia 08/04/2022. A categoria mais restritiva, mesotrófico, é caracterizada por corpos d'água

com produtividade moderada, com possíveis implicações na qualidade da água, porém, na maioria das vezes, em níveis aceitáveis (CETESB, 2007; Lamparelli, 2004).

E possível observar pequenas variações sazonais e anuais nos valores do IET. As linhas que representam ambas as microbacias ao longo do tempo demonstram tendências muito similares (Figura 10), sugerindo que fatores ambientais, como a precipitação, influenciam a qualidade da água atuam de forma semelhante em ambas.

Com a análise do intervalo de confiança de 95%, na comparação entre as médias anuais do período de 2004 a 2024, os anos de 2005, 2012, 2013, 2014 e 2021 apresentaram diferenças significativas entre as microbacias. Em praticamente todos os anos analisados, com exceção de 2004, as médias da microbacia de floresta nativa foram superiores as da microbacia de floresta plantada.

A análise das médias por estação chuvosa e seca revelou que os efeitos sobre a qualidade da água, variaram conforme o período do ano e o contexto ambiental. Em 2005, foram observadas diferenças significativas tanto na estação chuvosa quanto na seca. Em 2006, 2008 e 2012, as diferenças concentraram-se na estação chuvosa, o que pode indicar uma maior sensibilidade ao escoamento superficial e à entrada de nutrientes nessas épocas, possivelmente intensificada pela maior precipitação e transporte de material particulado. Por outro lado, os anos de 2014 e 2021 apresentaram diferenças significativas apenas no período seco, o que pode estar relacionado à menor diluição dos compostos e maior concentração de nutrientes nos corpos hídricos. Esses padrões reforçam a importância de considerar as variações sazonais e os efeitos hidrológicos no monitoramento e avaliação da qualidade da água em microbacias hidrográficas, especialmente diante de práticas de manejo e mudanças no UCT.

Quando analisado os anos de manejo florestal separadamente, de 2010 a 2023, não foi possível observar uma influência significativa, uma vez que, nos anos subsequentes, as microbacias permaneceram com o IET dentro do intervalo de confiança. Nesse período, ambas as microbacias foram classificadas como oligotróficas, caracterizadas por corpos d'água limpos, de baixa produtividade, onde não ocorrem interferências indesejáveis nos usos da água devido à presença de nutrientes (CETESB, 2007; Lamparelli, 2004).

Já a análise do IET nos períodos pré, durante e pós manejo florestal revelou diferenças significativas entre as microbacias de floresta nativa e plantada ao longo de todos os intervalos analisados (Tabelas 13 e 14). No primeiro ciclo de manejo (2010), os valores médios de IET foram mais elevados na microbacia de floresta nativa, com

diferenças estatísticas tanto no período pré, quanto durante o manejo e pos. Esse padrão se repetiu no segundo ciclo (2021–2024), em que o IET também foi significativamente maior na microbacia nativa, tanto no pré ($53,06 \pm 0,38$ vs. $52,06 \pm 0,57$) quanto durante o manejo ($50,88 \pm 0,72$ vs. $49,31 \pm 1,14$).

Esses resultados sugerem que, mesmo diante de intervenções como o corte de florestas plantadas, a qualidade da água, manteve-se consistentemente melhor na microbacia com floresta plantada. Esse padrão pode estar relacionado às características texturais do solo, considerando que a microbacia com vegetação nativa apresenta maior proporção de silte, o que pode favorecer maiores concentrações de minerais primários e menos sujeitos ao intemperismo, conforme já discutido anteriormente.

Cardoso, Zakia e Rodrigues (2022) no estudo das mesmas microbacias analisadas nesse trabalho, afirmaram que a microbacia com floresta nativa possui um IET maior em relação à microbacia com floresta plantada de *Pinus*. Os autores sugeriram que a microbacia com floresta nativa recebe um volume de fósforo total mais alto em seu deflúvio, provavelmente devido às diferenças na textura do solo, em que a microbacia com vegetação nativa possui maior teor de silte, o qual reflete em maiores concentrações de minerais primários e intemperáveis. Além disso, a microbacia com florestas plantadas de *Pinus* difere da microbacia com floresta nativa em função da maior variabilidade na disponibilidade de fósforo na água, indicando maior instabilidade.

No trabalho de Ferreira-Santos *et al.* (2024) realizado na bacia hidrográfica do ribeirão das Rosas, integrante da sub-bacia do rio Paraibuna (MG), os resultados demonstraram características típicas de ambientes mesotróficos, assim como no presente estudo. Entretanto, entre os índices avaliados, foram observadas diferenças na categorização trófica. Essa situação indica que o processo de eutrofização não está plenamente estabelecido e pode estar limitado por fatores ambientais. Houve diferenças estatísticas em cada um dos grupos de vazão, clorofila-a, fósforo total e IET. Vazão e clorofila-a estavam relacionadas aos pontos de coleta, enquanto fósforo total e IET estavam associados à sazonalidade. Os maiores valores medianos de fósforo total foram registrados no período seco, provavelmente pelo aporte difuso de efluentes não tratados na região. A concentração desse parâmetro apresentou não conformidade com a legislação em 100% das amostras.

No que diz respeito a análise de NDVI, a microbacia nativa apresentou valores que variaram de 0,11 a 0,41, enquanto na microbacia de floresta plantada, o NDVI variou de 0,09 a 0,54 no primeiro período de manejo (2010) e de 0,10 a 0,46 no segundo ano de

manejo. A utilização do NDVI permitiu identificar com clareza os anos e os talhões de manejo, além do tempo de recuperação. No primeiro período de manejo, a microbacia apresentou níveis baixos tanto no ano da retirada da vegetação quanto no ano seguinte (2011), com recuperação observada apenas em 2012. Já no segundo período de manejo, a recuperação ocorreu no ano subsequente (2024).

Embora as florestas plantadas compartilhem algumas semelhanças com as florestas naturais, elas podem ser diferenciadas pelas mudanças de longo prazo no NDVI. As florestas plantadas apresentam variações na taxa de mudança, nos valores médios e no desvio padrão do NDVI ao longo do tempo. Quando ainda são jovens e apresentam uma distribuição esparsa, os valores de NDVI são mais baixos. Em contraste, as florestas naturais mantêm valores mais altos de NDVI por períodos mais longos (Meng *et al.*, 2022).

4.5 Conclusões

Os resultados demonstraram que a precipitação e a vazão apresentaram variações significativas ao longo dos anos, com destaque para os picos de precipitação registrados em 2009 e 2015, anos associados a eventos climáticos extremos, como o El Niño. Nessas ocasiões, observou-se que os valores de nitrato na microbacia com floresta plantada superaram os da microbacia nativa, especialmente em 2015 e durante o período chuvoso de 2023.

A análise do fósforo revelou que, nos anos com diferença estatisticamente significativa entre as microbacias, a microbacia com vegetação nativa apresentou maiores concentrações. Essa tendência pode estar associada às características texturais do solo, principalmente ao maior teor de silte na microbacia nativa, que favorece a retenção de fósforo ligado a minerais primários menos suscetíveis ao intemperismo. Nos anos de 2008 e 2022, a microbacia plantada apresentou concentrações de fósforo aproximadamente 5% mais elevadas que as da microbacia nativa, coincidentes com valores de vazão abaixo da média histórica, sugerindo possível influência da correlação negativa observada entre fósforo e vazão. Nesses dois anos não houve diferença significativa entre as bacias.

Com relação ao Índice de Estado Trófico (IET), ambas as microbacias apresentaram valores semelhantes ao longo dos anos, oscilando entre as classes ultraoligotrófica e mesotrófica. Ainda assim, em quase todos os anos avaliados, exceto 2004, a microbacia com floresta nativa registrou médias superiores às da plantada, possivelmente refletindo as diferenças texturais do solo já mencionadas.

A utilização do NDVI contribuiu para a compreensão da dinâmica da cobertura vegetal, permitindo identificar os períodos de manejo e o tempo necessário para a recuperação do dossel nas áreas plantadas, reforçando a resiliência desse tipo de vegetação.

Por fim, mesmo durante e após os anos de manejo florestal, não foram observados aumentos significativos nos parâmetros analisados. Esses resultados sugerem que o manejo florestal em mosaico, quando adequadamente executado, não compromete diretamente a qualidade da água nas microbacias estudadas. Isso se confirma pela ocorrência de anos análogos em termos de precipitação e vazão, nos quais também não foram constatados impactos relevantes na qualidade da água.

4.6 Referências Bibliográficas (Capítulo 1)

ANGELINI, P. C. B. **Efeitos do uso do solo sobre o balanço de radiação e energia em Cuiabá–MT**. 2020. Tese (Doutorado em Física Ambiental) Cuiabá: Universidade Federal de Mato Grosso, 2020.

AMADOR-CASTRO, F. *et al.* Internet of Things and citizen science as alternative water quality monitoring approaches and the importance of effective water quality communication. **Journal of Environmental Management**, v. 352, p. 119959, fev. 2024.

BRAUN, A. C. Encroached by pine and eucalyptus? A grounded theory on an environmental conflict between forest industry and smallholder livelihoods in Chile. **Journal of Rural Studies**, v. 82, p. 107-120, 2021.

CARDOSO, K. J. B.; ZAKIA, M.; RODRIGUES, C. B. Índice de estado trófico em duas microbacias hidrográficas submetidas a diferentes coberturas florestais. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 9., 2022. **Anais...** [S. l.]: Congresso Florestal Brasileiro, 2022. v. 1, n. 1, p. 287-290. Disponível em: <https://doi.org/10.55592/CFB.2022.5095503>. Acesso em: 6 jul. 2025.

CETESB. **Relatório de Qualidade das Águas Interiores no Estado de São Paulo: 2006**. Série Relatórios—São Paulo: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2007.

CRUZ, G.C.F., 2007. Alguns aspectos do clima dos Campos Gerais. In: Melo, M.S., Moro, R.S., Guimarães, G.B. (Eds.), **Patrimônio natural dos Campos Gerais do Paraná**. Editora UEPG, 230 p.

DAEL, T. *et al.* Internal loading of phosphate in rivers reduces at higher flow velocity and is reduced by iron rich sand application: an experimental study in flumes. **Water Research**, v. 198, p. 117160, 2021.

DUFFY, C. *et al.* The impact of forestry as a land use on water quality outcomes: An integrated analysis. **Forest Policy and Economics**, v. 116, p. 102185, 2020.

FERREIRA-SANTOS, J. *et al.* Análise da Variação Temporal e Sazonal do Estado Trófico do ribeirão das Rosas, Juiz de Fora (Minas Gerais). **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v. 12, n. 1, 2024.

Federação das Indústrias do Estado do Paraná (Fiep). **Conheça Telêmaco Borba, a capital do papel e da madeira**. Disponível em: <https://www.fiepr.org.br/nossosistema/conheca-telemaco-borba-a-capital-do-papel-e-da-madeira--2-12480-133827.shtml>. Acesso em: 01 jul. 2024.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Cidades**. 2024. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pr/telemaco-borba/panorama>. Acesso em: 03 jul. 2024.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Produção da extração vegetal e da silvicultura. **IBGE: Departamento de Agropecuária**, ISSN: 01038435, 2022. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=774>. Acesso em 07 de jul. 2024.

Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM). Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Índice de Estado Trófico – IET**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://portalinfohidro.igam.mg.gov.br/sem-categoria/322-indice-de-estado-trofico-iet>>. Acesso em: 3 fev. 2024.

Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM). Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Índice de Estado Trófico – IET**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://igam.mg.gov.br/w/indice-de-estado-trofico-iet>>. Acesso em: 20 abril. 2025.

Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF). **PROMAB - Monitoramento e Modelagem em Microbacias**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.ipef.br/promab/>>. Acesso em: 3 fev. 2024.

JOHNSON, R. W. **Uma introdução ao Bootstrap**; Chapman & Hall: Nova York, NY, EUA, 2001; Volume 23.

LABAT, F.; THIEBAUT, G. A new trophic index (TIM2S) to evaluate trophic alteration of small shallow lakes: a predictive reference-based approach. **Hydrobiologia**, v. 850, n. 3, p. 519-536, 2023.

LAMPARELLI, M. C. **Grau de trofia em corpos d'água do Estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento**. Tese (Doutorado em ciências na Área de Ecossistemas Terrestres e Aquáticos)—São Paulo: Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, 2004.

LI, Y. *et al.* Dynamics of Land Use/Land Cover Considering Ecosystem Services for a Dense-Population Watershed Based on a Hybrid Dual-Subject Agent and Cellular Automaton Modeling Approach. **Engineering**, 2024.

LIMA, J. F. A localização da produção silvícola no estado do Paraná. **COLÓQUIO-Revista do Desenvolvimento Regional**, v. 18, n. 2, abr./jun., p. 177-192, 2021.

LOPES, M. M.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; SOARES, J. B. Utilização dos testes estatísticos de Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk para verificação da

normalidade para materiais de pavimentação. **Transportes**, São Paulo-SP, v. 21, n. 1 p. 59–66, 2013.

MENG, Y. *et al.* A planted forest mapping method based on long-term change trend features derived from dense Landsat time series in an ecological restoration region. **Remote Sensing**, v. 14, n. 4, p. 961, 2022.

MONTANHER, O. C. *et al.* CHUVAS EXTREMAS DURANTE O EL NIÑO DE 2015/2016 E SEUS EFEITOS GEOSISTÊMICOS NO NORTE DO PARANÁ. **Geoinfó: Revista do Programa de Pós-Graduação em Geografia Maringá**, v. 15, n. 1, p. 4-29, 2023. Edição Especial GEMA 35 anos ISSN 2175-862X (on-line).

NERY, J. T.; SIQUEIRA, B. Índice de Anomalia de Chuva aplicado ao estudo das precipitações no Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 27, p. 772-788, 2020.

PADILLA, F. M., GALLARDO, M., MANZANO-AGUGLIARO, F. Global trends in nitrate leaching research in the 1960–2017 period. **Science of the Total Environment**, 643, 400-413, 2018.

RODRIGUES, C. B. *et al.* Efeitos do manejo de florestas plantadas de Eucalyptus sobre nutrientes e sedimentos em riachos. **Engenharia florestal: desafios, limites e potencialidade**, 2020.

ROUSE, J. W. *et al.* Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. **Proceedings**, 3rd Earth Resource Technology Satellite (ERTS) Symposium, vol. 1, p. 48-62, 1974.

RUMSEY, D. J. What is r value correlation? **Dummies**, 6 fev. 2023. Disponível em: <https://www.dummies.com/article/academics-the-arts/math/statistics/how-to-interpret-a-correlationcoefficient-r-169792/>. Acesso em: 03 abril de 2025.

SOUSA, Á. Coeficiente de correlação de Pearson e coeficiente de correlação de Spearman: O que medem e em que situações devem ser utilizados? **Correio dos Açores: Matemática**, p. 19, 2019.

United States Geological Survey (USGS), 2025. **EarthExplorer**. Disponível em: <http://earthexplorer.usgs.gov/>.

VOIGTLAENDER, M. **Caracterização hidrológica e biogeoquímica de microbacias: uma comparação entre Mata Atlântica e Pinus taeda L.** 2007. 75p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais). Universidade de São Paulo, 2007.

WANG, Y. *et al.* Effects of land-use patterns on seasonal water quality at multiple spatial scales in the Jialing River, Chongqing, China. **Catena**, v. 234, p. 107646, 2024.

WOJTKOWSKA, M.; BOJANOWSKI, D. Assessing trophic state of surface waters of Służewiecki Stream (Warsaw). **Applied Water Science**, v. 11, n. 7, p. 118, 2021.

ZUO, J. *et al.* Eutrophication increases the similarity of cyanobacterial community features in lakes and reservoirs. **Water Research**, v. 250, p. 120977, fev. 2024.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos neste estudo indicam que a alteração no uso e cobertura da terra por florestas plantadas não comprometem diretamente a qualidade da água, sendo que a microbacia plantada demonstrou bom desempenho em termos de vazão e concentração de nutrientes, especialmente quando comparada à microbacia de floresta nativa. Contudo, a continuidade do monitoramento é essencial, uma vez que a lixiviação de compostos nitrogenados, especialmente em agroecossistemas, pode continuar representando um desafio para a sustentabilidade dos recursos hídricos em longo prazo. Assim, políticas de manejo e monitoramento contínuo devem ser implementadas para garantir a qualidade ambiental e a conservação das microbacias hidrográficas.

É relevante destacar o tipo de manejo adotado na área de estudo, o manejo florestal em mosaico, que se mostrou, mais uma vez, eficaz, uma vez que a substituição do uso e cobertura da terra não comprometeu a qualidade da água.

Como sugestão para estudos futuros, recomenda-se a aplicação do teste de infiltração no solo, utilizando o Infiltrômetro de Anéis Concêntricos, com o objetivo de determinar a condutividade hidráulica e a taxa básica de infiltração. Considerando que as microbacias hidrográficas analisadas apresentam características de solo distintas, essa abordagem pode proporcionar melhor compreensão dos processos de transporte de nutrientes, como fósforo e nitrato, auxiliando na avaliação mais precisa da qualidade da água.

Além disso, visando ampliar o entendimento dos efeitos da precipitação sobre os diferentes usos do solo, recomenda-se a inclusão da análise dos dados pluviométricos referentes aos anos de 2023 e 2024. Também sugere-se o monitoramento do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) nos seis primeiros meses subsequentes ao corte da vegetação, a fim de avaliar o processo de restabelecimento da cobertura vegetal.