



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Rafael Barros Mothé

Monitoramento ambiental da bacia hidrográfica do rio Guandu

Rio de Janeiro

2024

Rafael Barros Mothé

Monitoramento ambiental da bacia hidrográfica do rio Guandu



Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro como requisito para obtenção do título de mestre. Área de concentração: Saúde Ambiental e Trabalho.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Alena Torres Netto

Coorientadora: Prof^ª. Dr^ª. Rosane Cristina de Andrade

Rio de Janeiro

2024

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

M918 Mothé, Rafael Barros.
Monitoramento ambiental da bacia hidrográfica do Rio Guandu / Rafael Barros Mothé. – 2024.
85 f.

Orientadora: Alena Torres Netto.
Coorientadora: Rosane Cristina de Andrade
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia ambiental - Teses. 2. Monitorização ambiental - Teses. 3. Testes de toxicidade - Teses. 4. Água - Qualidade - Teses. 5. Guandu, Rio, Bacia (RJ) - Teses. I. Torres Netto, Alena. II. Andrade, Rosane Cristina de. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. IV. Título.

CDU 556.51(815.3)

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Rafael Barros Mothé

Monitoramento ambiental da bacia hidrográfica do rio Guandu

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro como requisito para obtenção do título de mestre. Área de concentração: Saúde Ambiental e Trabalho.

Aprovada em 26 de fevereiro de 2024.

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **ALENA TORRES NETTO**
Data: 14/03/2024 10:19:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^ª. Dr^ª. Alena Torres Netto (Orientadora)
Faculdade de Engenharia – UERJ

Documento assinado digitalmente
 **ROSANE CRISTINA DE ANDRADE**
Data: 13/03/2024 13:00:14-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^ª. Dr^ª. Rosane Cristina de Andrade (Co-Orientadora)
Faculdade de Engenharia - UERJ

Documento assinado digitalmente
 **EDGARD HENRIQUE OLIVEIRA DIAS**
Data: 13/03/2024 10:52:55-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof Dr. Edgard Henrique Oliveira Dias
Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF

Documento assinado digitalmente
 **EURICO HUIZWARA**
Data: 13/03/2024 08:31:46-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Eurico Huziwara
Faculdade Estácio de Sá - UNESA

Rio de Janeiro

2024

DEDICATÓRIA

Ao meu pai, pelo exemplo de força, garra e perseverança e à minha mãe, a quem devo a inspiração para ser cada vez melhor e quem sabe um dia corresponder a sua importância. Dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradecer me parece muito pouco neste momento de finalização de um ciclo. Nesses momentos de reflexão percebo que sou abençoado. Não só pelas experiências que vivi, mas, principalmente, pelas pessoas que conheci, que de algum modo me ajudaram a ser quem sou hoje. Pessoas que irei citar agora.

Aos meus pais, Carlos Natalício Domingues Mothé e Gileane dos Santos Barros Mothé, meus maiores parceiros e incentivadores. exemplos de vida, de força e de luta, obrigado pelos ensinamentos, obrigado pelas risadas, obrigado pela dedicação, obrigado pelo colo nos momentos difíceis, obrigado por absolutamente cada segundo, desde o meu primeiro suspiro até hoje. Obrigado meus grandes amores. Eu amo muito vocês, meus pais. Muito mais do que se pode expressar por palavras.

As minhas irmãs, Camila Barros Mothé e Gabriele Barros Mothé, minhas referências de amizade incondicional e com quem eu aprendi o significado de parceria, dividir, compartilhar e de ser para sempre! Não há nada melhor do que ter em alguém a lembrança viva do seu passado. Obrigada por serem, sobretudo, este lugar para estar, ser e permanecer. E às minhas sobrinhas, Laura Barros Mothé Quintanilha e Manuella Barros Mothé Quintanilha, os meus bebês que não são meus, mas a quem eu pertença.

À minha parceira, meu porto seguro, maravilhoso presente que a vida me deu, Anna Jullia, que assim como um sol, irradia tranquilidade, felicidade e alegria por onde passa e que me ensina diariamente a ser uma pessoa melhor... obrigado por me incentivar, auxiliar e lutar com todas as forças comigo e por mim, e por fazer o meu dia a dia ser mais feliz, muito mais feliz.

Aos meus avós, Geni Domingues Mothé, Alcides Mothé, Rosenilda Nascimento dos Santos Barros e especialmente ao 'véio' Joninha, Jonas de Azeredo Barros, exemplo de força e dignidade, perto de você tudo respira alegria. Sou grata por tê-los em minha vida, apoiando e amando.

À toda a minha família, pelo afeto e parceria, por sempre estar ao meu lado, torcendo junto e vibrando a cada conquista.

À minha orientadora, Prof^ª Dr^ª Alena Torres Netto, por ter me recebido e acolhido tão bem tanto na graduação quanto na pós-graduação e por me ensinar tanto e sempre nesses últimos anos, para além da ciência, me ensinar com os melhores exemplos de garra, elegância, inteligência, diplomacia, força e assim me inspirar a ser um profissional, professor e cientista

excepcional como você é. Seu suporte e amizade foram fundamentais.

Obrigada por tudo, 'prof'!

À minha coorientadora Prof^a Dr^a Rosane Cristina de Andrade, todo o meu respeito e admiração, pela expertise e inteligência tão admiráveis e por ter me dado a oportunidade de aprender sempre e tanto com você.

Aos meus grandes amigos Mariana, Victor, Paula, Wesley, Orestes, que estiveram comigo durante a graduação, mesmo que cada um com sua especialidade, e que já compartilharam comigo momentos de alegria e tristeza, tenho absoluta cumplicidade e certeza de que nossas amizades perdurarão para sempre, mesmo que fiquemos longe fisicamente, a amizade não é medida em proximidade, mas por carinho, e este certamente supera toda a distância.

Aos meus amigos futuros mestres Jean e Agatha, pessoas e profissionais maravilhosos que a pós-graduação me trouxe, com quem compartilhei meus medos, minhas inseguranças e minhas vitórias neste turbulento período na UERJ. Nós conseguimos!

À toda equipe do Laboratório de Engenharia Sanitária (LES-UERJ): Prof. Dr^a Danielle, aos técnicos Sidney e Daniele, aos mestrandos e doutorandos Arthur, Stella, Allan, Fabiana, Layla, Tainá, Agape e aos ICs Matheus, Giovana, Gabriela, Thiago, Victória e Camila, pela parceria, apoio, ensino e amizade de sempre. Também um agradecimento especial a Louise da Cruz Felix pelo acolhimento e total dedicação em ensinar, que muito contribuiu para a realização desta e das demais pesquisas, além de todo apoio intelectual e expertise.

A todos aqueles que de alguma forma estão comigo nessa luta e não tiveram o nome citado nestas linhas, as minhas desculpas e o meu carinho.

Por fim, agradeço à Universidade do Estado do Rio de Janeiro, com destaque para o Departamento de Engenharia Sanitária de do Meio Ambiente por fornecerem as condições de infraestrutura física e administrativa, sempre necessárias ao desenvolvimento de uma dissertação de mestrado. Sou muito grato também aos coordenadores e professores do Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária (PEAMB), que direta ou indiretamente forneceram condições para a execução e conclusão do meu mestrado.

Obrigado por entrarem para a história da minha vida. A todos, obrigado por tanto, obrigado por tudo!

RESUMO

MOTHÉ, Rafael Barros. *Monitoramento ambiental da bacia hidrográfica do rio Guandu*. 85 f. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

A gestão sustentável dos recursos hídricos tornou-se um desafio premente na atualidade e no âmbito global, exigindo uma abordagem integrada e multidisciplinar para compreender e abordar as complexas interações que afetam a qualidade da água. Dentro desse contexto, a pesquisa se inicia por uma revisão bibliográfica de temas relevantes ao assunto abordado, no qual desenvolveu-se uma fundamentação teórica com base na problemática apresentada. Com o auxílio do programa ArcGIS e das referências bibliográficas, foram levantadas as características da bacia hidrográfica do rio Guandu para a escolha dos pontos de coleta. Foram realizadas coletas de campo mensais entre janeiro e julho de 2023 em cinco pontos distintos, sendo três no rio Guandu, um no rio dos Poços e o último no rio Queimados para a realização de ensaios em laboratório de ecotoxicidade, físico-químicos para a elaboração do IQA-NSF e IQA-CETESB e de detecção de agrotóxicos. Os resultados revelaram uma variação expressiva nos níveis de coliformes totais, DBO, fosfato e nitrato, evidenciando potenciais fontes de contaminação à saúde dos ecossistemas aquáticos. Os pontos de amostragem, especialmente o ponto 4 (rio dos Poços) e ponto 5 (rio Queimados) apresentaram resultados preocupantes em todos os parâmetros analisados, evidenciando a influência de atividades humanas, como lançamento de efluente sanitário *in natura* e atividades industriais. Tais fatos estão em desacordo com os padrões preconizados pela resolução CONAMA nº 357/2005, ressaltando a necessidade de medidas corretivas urgentes para mitigar os impactos negativos já presentes na água. Além disso, os resultados de Índice de Qualidade de Água revelaram classificações com predominância das categorias média e ruim, evidenciando a degradação geral de toda a bacia hidrográfica do rio Guandu. As análises de ecotoxicidade utilizando os organismos-teste *Raphidocelis subcapitata* e *Vibrio fischeri* demonstraram uma alta taxa de mortalidade dos organismos, indicando um ambiente aquático adverso, resultados que podem ter sido agravado por conta da detecção do agrotóxico Diuron em água. Por fim, com base nos dados apresentados, foi levantado a discussão a respeito do cumprimento das metas dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da agenda 2030, o levantamento dos serviços ecossistêmicos impactados e a proposição de métodos de recuperação e mitigação ambiental visando a melhora da qualidade e restauração das características originais dos corpos hídricos estudados.

Palavras-Chave: Agenda 2030; Ecotoxicidade; Geoprocessamento remoto; Índice de qualidade de água; Serviços ecossistêmicos.

ABSTRACT

MOTHÉ, Rafael Barros. *Monitoring of environmental of the Guandu River watershed*. 85 f. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

The sustainable management of water resources has become a pressing challenge in contemporary times and on a global scale, demanding an integrated and multidisciplinary approach to understand and address the complex interactions affecting water quality. Within this context, the research begins with a literature review of relevant topics to the subject, in which a theoretical framework was developed based on the presented issues. With the assistance of the ArcGIS program and bibliographic references, the characteristics of the Guandu River watershed were surveyed to select sampling points. Monthly field collections were conducted between January and July 2023 at five distinct points, three along the Guandu River, one along the Poços River, and the last one along the Queimados River, for laboratory assays including ecotoxicity tests, physicochemical analyses for the elaboration of IQA-NSF and IQA-CETESB, and detection of pesticides. The results revealed significant variations in levels of total coliforms, BOD, phosphate, and nitrate, highlighting potential sources of contamination impacting the health of aquatic ecosystems. The sampling points, especially point 4 (Poços River) and point 5 (Queimados River), exhibited alarming results across all analyzed parameters, indicating the influence of human activities such as discharge of untreated sewage and industrial activities. These findings are inconsistent with the standards set by CONAMA Resolution 357/2005, underscoring the need for urgent corrective measures to mitigate the already-present negative impacts on water quality. Additionally, the Water Quality Index results revealed predominance of poor and fair classifications, demonstrating the overall degradation of the entire Guandu River watershed. Ecotoxicity analyses using the test organisms *Raphdocelis subcapitata* and *Vibrio fischeri* showed a high mortality rate among organisms, indicating an adverse aquatic environment, possibly exacerbated by the detection of the pesticide Diuron in water. Finally, based on the presented data, discussions were raised regarding the achievement of Sustainable Development Goals outlined in the 2030 agenda, the assessment of impacted ecosystem services, and the proposal of environmental recovery and mitigation methods aimed at improving the quality and restoring the original characteristics of the studied water bodies.

Keywords: 2030 Agenda; Ecosystem Services; Ecotoxicity; Remote Geoprocessing; Water Quality Index.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Abastecimento de água na região metropolitana do Rio de Janeiro.....	18
Figura 2 - Unidades de conservação na Região Hidrológica II.....	21
Figura 3 - Área (em km ²) ocupada por diferentes classes de uso do solo na UHP do rio Guandu.	22
Figura 4 - Objetivos de desenvolvimento sustentável.....	27
Figura 5 - Categorias dos serviços ecossistêmicos de acordo com Millennium Ecosystem Assessment (MEA).....	30
Figura 6 - Estimativa de valoração de alguns serviços ecossistêmicos.....	31
Figura 7 - Estimativa de valoração de alguns serviços ecossistêmicos.....	39
Figura 8 - Mensuração do parâmetro OD realizada a campo a partir de amostra de água coletada da Ba-cia Hidrográfica do Rio Guandu	43
Figura 9 - Ensaio de E. coli realizado em laboratório a partir de amostra de água coletada da Bacia Hidrográfica do Rio Guandu.	44
Figura 10 - Mensuração do pH realizado em laboratório a partir de amostra de água coletada da Bacia Hidrográfica do Rio Guandu	45
Figura 11 - Mensuração realizada em laboratório da turbidez de amostra de água coletada da Bacia Hidrográfica do Rio Guandu	47
Figura 12 - Mensuração realizada em campo com o parâmetro temperatura em destaque.....	48
Figura 13 - Curvas médias de variação de qualidade das águas do IQA-NSF.....	50
Figura 14 - Curvas médias de variação de qualidade das águas do IQA-Cetesb	51
Figura 15 - Ensaio de Raphidocelis subcapitata sendo realizado com placas de 24 poços, acondicionadas a temperatura, agitação e luminosidade controlada	54
Figura 16 - Aparelho de Microbiocns Microtox utilizado nos ensaios de toxicidade aguda de Vibrio fischeri.....	55
Figura 17 - Variação Mensal de E. coli (UFC/100ml) nos Pontos de Amostragem de água ao longo do curso do rio Guandu, rio dos Poços e rio Queimados.	57
Figura 18 - Variação Mensal de DBO (mg/l O ₂) nos Pontos de Amostragem de água ao longo do curso do rio Guandu, rio dos Poços e rio Queimados.	58
Figura 19 - Variação Mensal de Fosfato total (mg/l) nos Pontos de Amostragem de água ao longo do curso do rio Guandu, rio dos Poços e rio Queimados	59

Figura 20 - Variação Mensal de Nitrato(mg/l) nos Pontos de Amostragem de água ao longo do curso do rio Guandu, rio dos Poços e rio Queimados	61
Figura 21 - Variação Mensal de Oxigênio Dissolvido (% de saturação) nos Pontos de Amostragem de água ao longo do curso do rio Guandu, rio dos Poços e rio Queimados.....	62
Figura 22 - Variação Mensal de pH nos Pontos de Amostragem de água ao longo do curso do rio Guandu, rio dos Poços e rio Queimados	63
Figura 23 - Variação Mensal de Sólidos Totais Dissolvidos(mg/l) nos Pontos de Amostragem de água ao longo do curso do rio Guandu, rio dos Poços e rio Queimados	64
Figura 24 - Variação Mensal de Temperatura (°C) nos Pontos de Amostragem de água ao longo do curso do rio Guandu, rio dos Poços e rio Queimados	65
Figura 25 - Variação Mensal de Turbidez (NTU) nos Pontos de Amostragem de água ao longo do curso do rio Guandu, rio dos Poços e rio Queimados	66
Figura 26 - Resultados de IQA-NSF por ponto de coleta de água ao longo do curso do rio Guandu, rio dos Poços e rio Queimados por mês e suas respectivas faixas.....	67
Figura 27 - Resultados de IQA-CETESB por ponto de coleta de água ao longo do curso do rio Guandu, rio dos Poços e rio Queimados por mês e suas respectivas faixas.....	68
Figura 28 - Variação Mensal do crescimento da Microalga <i>Raphidocelis subcapitata</i> (%) nos Pontos de Amostragem de água ao longo do curso do rio Guandu, rio dos Poços e rio Queimados	70
Figura 29 - Variação Mensal de produção de luz da bactéria <i>Vibrio fischeri</i> (%) nos Pontos de Amostragem de água ao longo do curso do rio Guandu, rio dos Poços e rio Queimados.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Uso da terra na área de preservação permanente do rio Guandu, RJ.	23
Tabela 2 - Classificação da qualidade da água nas faixas de IQA-NSF e IQA-CETESB	52
Tabela 3 - Índice pluviométrico da Bacia Hidrográfica do Rio Guandu nos meses avaliados	56
Tabela 4 - Concentrações de agrotóxicos encontrados nas amostras de água ao longo do curso do rio Guandu, rio dos Poços e rio Queimados	72

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 -Classificação de alguns agrotóxicos, presentes na portaria PRC MS nº 888/2021, quanto ao potencial de transporte associado ao sedimento e dissolução em água.	25
Quadro 2 - Variáveis utilizadas e seus pesos relativos para cálculo do IQA-NFS.....	49
Quadro 3 - Variáveis utilizadas e seus pesos relativos para cálculo do IQA-CETESB	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGNU	ASSEMBLEIA GERAL DAS NAÇÕES UNIDAS
APP	ÁREA DE PROTEÇÃO PERMANENTE
BHRG	BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO GUANDU
CETESB	COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO
DBO	DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGÊNIO
ETA	ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA
IQA	ÍNDICE DE QUALIDADE DE ÁGUA
LD	LIMÍTE DE DETECÇÃO
NASA	NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION
NSF	NATIONAL SCIENCE FOUNDATION
OD	OXIGÊNIO DISSOLVIDO
ODS	OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL
ONU	ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS
PERH	PLANO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS
pH	POTENCIAL HIDROGENIÔNICO
PSA	PAGAMENTO POR SERVIÇOS AMBIENTAIS
RH II	REGIÃO HIDROGRÁFICA II
RMRJ	REGIÃO METROPOLITANA DO RIO DE JANEIRO
RPPN	RESERVA PARTICULAR DE PATRIMÔNIO NATURAL
SE	SERVIÇOS ECOSISTÊMICOS
UC	UNIDADE DE CONSERVAÇÃO
VMP	VALOR MÁXIMO PERMITIDO

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	15
1. OBJETIVOS	16
1.1. OBJETIVO GERAL	16
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1. BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO GUANDU	17
2.2. COMPOSTOS E POLUENTES: ORIGENS E CONSEQUÊNCIAS	23
2.3. OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E OS SERVIÇOS ECOSISTÊMICOS	26
2.4. GEOPROCESSAMENTO REMOTO: HISTÓRIA, IMPORTÂNCIA E UTILIZAÇÃO	32
2.5. QUALIDADE DA ÁGUA; DO MANANCIAL AO SANEAMENTO BÁSICO NO BRASIL	33
2.6. ECOTOXICIDADE: UMA IMPORTANTE FERRAMENTA PARA O MEIO AMBIENTE	37
3. METODOLOGIA	39
3.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	39
3.2. GEOPROCESSAMENTO REMOTO, LEVANTAMENTO DE DADOS E ESCOLHA DOS PONTOS DE COLETA DA ÁGUA	40
3.3. PLUVIOMETRIA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO GUANDU	41
3.4. PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS E BIOLÓGICOS	42
3.4.1. <i>Oxigênio Dissolvido</i>	42
3.4.2. <i>Coliformes termotolerantes/ E. Coli</i>	43
3.4.3. <i>pH</i>	44
3.4.4. <i>Demanda Bioquímica por Oxigênio</i>	45
3.4.5. <i>Fósforo</i>	46
3.4.6. <i>Nitrogênio</i>	46
3.4.7. <i>Turbidez</i>	47
3.4.8. <i>Sólidos</i>	47
3.4.9. <i>Temperatura</i>	48
3.5. ÍNDICE DE QUALIDADE DE ÁGUA – IQA	49
3.6. ENSAIO DE AGROTÓXICOS	53
3.7. ENSAIO DE ECOTOXICIDADE	53
3.7.1. <i>Ensaio de toxicidade crônica de Raphdocelis subcaptata</i>	53
3.7.2. <i>Ensaio de toxicidade aguda de Vibrio fischeri</i>	54

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
4.1. RESULTADOS DO MONITORAMENTO E IQA	56
4.2. RESULTADOS DA ECOTOXICIDADE E AGROTÓXICOS	68
4.3. IMPLICAÇÕES E IMPACTOS	733
CONSIDERAÇÕES FINAIS	80
REFERÊNCIAS	81

INTRODUÇÃO

A gestão sustentável dos recursos hídricos tornou-se um desafio premente na atualidade, exigindo uma abordagem integrada e multidisciplinar para compreender e abordar as complexas interações que afetam a qualidade da água. Dentro desse contexto, a bacia hidrográfica do Rio Guandu, localizada no estado do Rio de Janeiro, emerge como um foco de particular relevância, dada sua importância estratégica para o abastecimento de água na região (KIM, 2011; COMITÊ GUANDU, 2013; ONE HEALTH COMISSION, 2020; RAMOS, 2021).

Ao explorar aspectos cruciais relacionados à qualidade da água na Bacia do Rio Guandu, é nítida a presença crescente de poluentes contemporâneos, como microplásticos, contaminantes emergentes e agrotóxicos. A contaminação por esses agentes químicos representa uma ameaça crescente para a saúde ambiental e humana, refletindo diretamente nos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pelas Nações Unidas (COMITÊ GUANDU, 2013; COPPETEC, 2014; REIS FILHO, 2017).

O avanço tecnológico, notadamente o uso de geoprocessamento remoto, surge como uma ferramenta valiosa e indispensável nos dias de hoje para a compreensão da dinâmica espacial e temporal dos poluentes e da degradação crescente em bacias hidrográficas (SANTOS, 2014; RAMOS, 2021). Nesse sentido, esta pesquisa adota uma abordagem inovadora ao integrar técnicas de monitoramento e ensaios laboratoriais para caracterizar e analisar a qualidade da água da bacia, fornecendo uma visão abrangente e atualizada para avaliação da qualidade ambiental da bacia do Guandu.

No âmbito Nacional, a discussão sobre a qualidade das águas adquire uma dimensão crucial, destacando desafios e oportunidades para a implementação de políticas públicas eficazes. Além disso, a ênfase na importância da ecotoxicidade na avaliação da saúde dos ecossistemas aquáticos destaca a necessidade premente de uma abordagem holística para a gestão sustentável do meio ambiente (KIM, 2011; ONE HEALTH COMISSION, 2020; RAMOS, 2021).

Ao longo desta dissertação, serão explorados não apenas os aspectos técnicos e científicos da qualidade da água, mas também as implicações sociais, econômicas e ambientais, e suas interconexões, visando contribuir para a construção de estratégias eficazes e sustentáveis para a preservação dos recursos hídricos na Bacia hidrográfica do Rio Guandu e, por extensão, na saúde da população.

1. OBJETIVOS

1.1. Objetivo geral

Analisar a bacia hidrográfica do rio Guandu integrando monitoramento e análises da água.

1.2. Objetivos específicos

- Avaliar a degradação ambiental em diferentes pontos para coleta de amostras de água da bacia hidrográfica do rio Guandu.
- Avaliar a qualidade da água em diferentes corpos hídricos que compõem a bacia hidrográfica do rio Guandu e por meio da análise físico-químicas e microbiológicas a fim de compor o índice de qualidade de água (IQA).
- Levantar informações sobre possíveis fontes poluidoras do rio Guandu
- Determinar a toxicidade dos corpos hídricos para a fauna e flora local (ecotoxicidade) em dois níveis tróficos
- Verificar quais Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) serão impactados com os resultados encontrados
- Fazer o levantamento dos serviços ecossistêmicos que são dependentes e que podem ser direta e/ou indiretamente afetados pelo fornecimento e pela qualidade da água da bacia do rio Guandu
- Propor métodos de mitigação e recuperação ambiental específicos para cada dano ambiental encontrado

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Bacia hidrográfica do rio Guandu

Uma bacia hidrográfica ou bacia de drenagem corresponde a uma porção da superfície da terra drenada por um rio principal, seus afluentes e subafluentes, tendo grande importância para o abastecimento urbano, rural, de indústrias, termoeletricas, mineração, irrigação, dessedentação de animais, pesca, aquicultura, turismo, lazer e potencial hidrelétrico (CNRH, 2003; ANA, 2023).

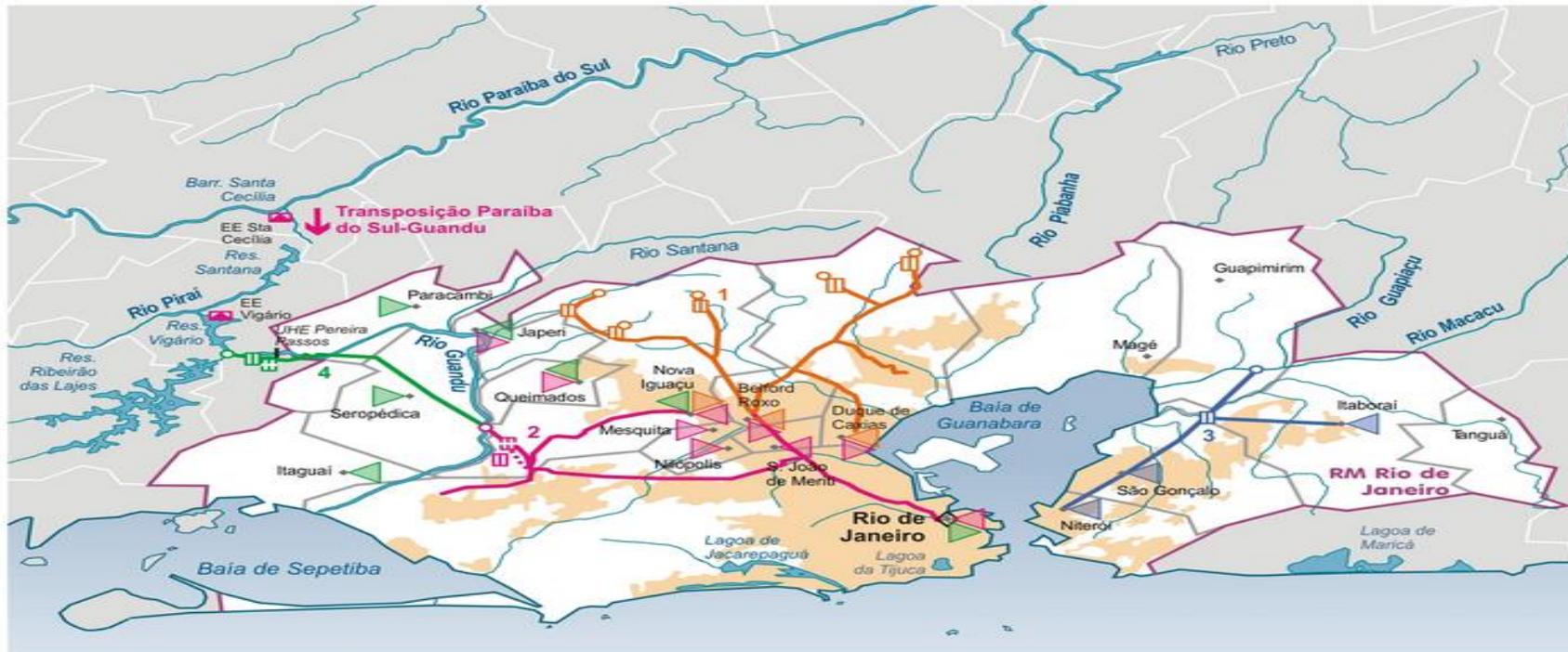
As bacias dos rios Guandu (1.385 km²), da Guarda (346 km²) e Guandu Mirim (190 km²), juntamente com as bacias contribuintes à baía de Sepetiba compõem a Região Hidrográfica II (RH II) e estão sob a do Comitê das Bacias Hidrográficas dos Rios Guandu, da Guarda e Guandu Mirim (Comitê Guandu), instituído em 2002. Segundo o Comitê Guandu (2018), essas bacias abrangem, juntas, 15 municípios fluminenses com população residente estimada para o ano de 2022 de 1,69 milhão de habitantes (COMITÊ GUANDU, 2018; RAMOS, 2021; IBGE, 2022).

Considerando a população localizada dentro da RH II, 97,6% correspondem à população urbana e 2,4% a população rural, sendo o Rio de Janeiro o município com maior número de habitantes residentes na RH II Guandu, com 1.101.284 habitantes (equivalente a 39,1 % da totalidade de habitantes residentes na RH II) e Vassouras o menor município, com 516 mil habitantes (COMITÊ GUANDU, 2018).

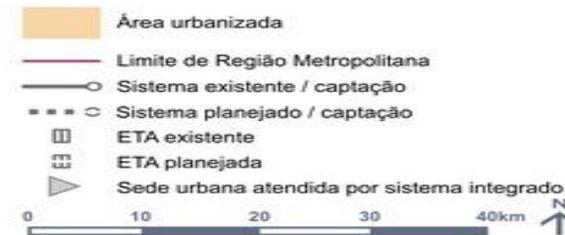
As chuvas na Bacia Hidrográfica do Rio Guandu (BHRG) estão associadas a diversos processos atmosféricos apresentando uma média de 1.500 mm/ano, com maior concentração entre dezembro e março, e os períodos mais secos entre junho e setembro (COMITÊ GUANDU, 2018).

Originalmente, o rio Guandu tinha uma vazão muito pequena que inviabilizava qualquer alternativa de abastecimento de água para a população e necessidade de atendimento da usina hidrelétrica existente no local. Em 1952, com o objetivo de geração de energia e atendimento a alta demanda hídrica, foi proposta uma transposição para aumentar a vazão do rio Guandu a partir de um importante manancial, o rio Paraíba do Sul (CEDAE, 2020). Nesse processo, o rio Paraíba do Sul cedeu cerca de 60% de suas águas para o Guandu, por meio das canalizações forçadas da usina hidrelétrica da Light, a jusante de Santa Cecília. Essa transposição encontra as águas do rio Ribeirão das Lajes e desce para formar o Guandu e abastecer a Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) (Figura 1) (ANA, 2010).

Figura 1 - Abastecimento de água na região metropolitana do Rio de Janeiro.



- 1 SIN Acari
- 2 SIN Guandu
- 3 SIN Imunana-Laranjal
- 4 SIN Ribeirão das Lajes



Fonte: ANA, 2010.

No entanto, devido ao crescimento desordenado das cidades, a bacia tem sofrido com os recorrentes impactos ambientais como assoreamento, redução da mata ciliar, lançamento de efluentes sanitários, uma vez que ainda temos baixa porcentagem de tratamento do esgoto coletado, afetando, sobremaneira, a qualidade das águas e pondo em risco a saúde da população (PROFILL ENGENHARIA, 2017). Portanto é crucial monitorar a qualidade da água para assegurar que o abastecimento esteja em conformidade com os padrões normativos, evitando potenciais impactos à saúde humana e do meio ambiente (COMITÊ GUANDU, 2013; COPPETEC, 2014; IBGE 2019; ONE HEALTH COMMISSION, 2020).

Após sua formação, o rio Guandu segue rumo ao sul, margeando as áreas urbanas de Japeri até a via Dutra km 205. Pouco abaixo do município de Japeri, ele recebe a contribuição das águas do rio São Pedro, depois disso também recebe outros afluentes como o rio Poços e seu tributário, o rio Queimados, e logo após o rio Ipiranga, afluente mais próximo da estação de tratamento de água da CEDAE. Os rios elencados são amplamente conhecidos pelo seu elevado estado de degradação ambiental (NOGUEIRA, 2011; REIS FILHO, 2017, RAMOS, 2021).

O rio Queimados, importante afluente do rio dos Poços, apresenta qualidade de água comprometida desde sua nascente até o encontro com o rio Guandu, pois seu leito é amplamente utilizado como corpo receptor de grande quantidade de esgoto *in natura* gerado pela área urbana do município de Queimados, além de receber indiscriminadamente efluentes industriais do Polo Industrial de Queimados (RAMOS, 2021).

Os rios Cabuçu e Ipiranga nascem na Serra do Mendanha, sob área de proteção ambiental, apresentando uma boa qualidade de água no seu curso superior. Contudo, estes corpos hídricos não conseguem depurar a elevada carga orgânica recebida a jusante, ao atravessar o município de Nova Iguaçu, e chegam em estado de degradação quando encontram o rio Guandu (AGRAR, 2009).

A convergência desses tributários de baixa qualidade com o rio Guandu ocorre pouco antes da captação da Estação de Tratamento de Água do Guandu (ETA Guandu), num local constantemente alagado que ficou conhecido como Lagoa Guandu (GIORI, 2011; KIM, 2011). A Lagoa Guandu se formou nos anos de 1950/1960 a partir da construção e operação das barragens da CEDAE (AGRAR, 2009, COMITÊ GUANDU, 2018). O nome, Lagoa Guandu, refere-se ao fato de a área funcionar como uma lagoa de estabilização, amortecendo a poluição dos rios Poços, Queimados e Ipiranga, cujos indicadores de poluição são bem maiores que do rio Guandu (COELHO; AZEVEDO; VOLSCHAN JUNIOR, 2012; PAULA, 2022). Contudo, vale ressaltar que a Lagoa Guandu não foi oficialmente planejada para diminuir os níveis de

poluição, tal qual uma lagoa de estabilização, funcionando apenas para conter as águas de baixa qualidade vindas desses tributários (FERNANDES, 2018, COMITÊ GUANDU, 2018).

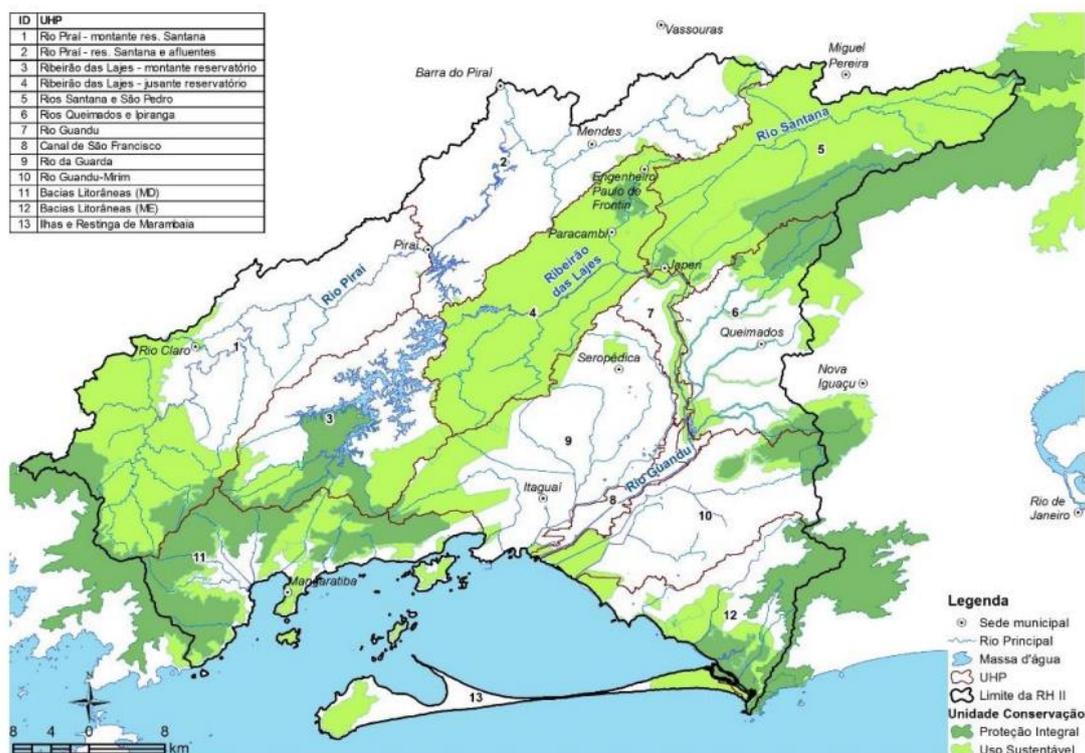
Para separar a área de captação da ETA Guandu das águas poluídas da Lagoa Guandu foram construídos diques de contenção (RAMOS, 2021). Esses barramentos impostos à Lagoa Guandu favorecem uma situação de baixa renovação hídrica, o que agrava a situação da qualidade da sua água (SEBER, 2005). Portanto, as águas da Lagoa Guandu possuem elevada carga orgânica proveniente dos efluentes industriais, esgoto e lixo despejados em seus afluentes que, acrescidas a condição de insolação natural e ao ambiente lântico, torna o ambiente propício ao desenvolvimento de diversos microrganismos, como as cianobactérias, representando um risco para BHRG (VETTORAZZI *et al.*, 2012).

Após a captação da CEDAE, o rio Guandu segue em sentido sudoeste chegando na sua parte final conhecida como Canal de São Francisco (NOGUEIRA, 2011). A canalização desta parte final do rio Guandu foi uma forma de compensar as enchentes na região, em vista da pequena declividade natural (REIS FILHO, 2017). O Canal de São Francisco apresenta cerca de 15 km de extensão e atravessa um importante zona industrial, o Polo Industrial de Santa Cruz, desembocando na baía de Sepetiba, foz do rio Guandu (KIM, 2011; SANTOS, 2014, RAMOS, 2021).

Observa-se que na Zona Costeira da RH II Guandu há uma grande riqueza ambiental. Pode-se citar a Baía da Ilha Grande, a Baía de Sepetiba e a Baía de Guanabara, todas com alto potencial turístico a ser explorado e que também sofrem diversas pressões antrópicas com alto potencial poluidor como: portos, indústrias, habitação, dutos etc.

Sobre a conservação ambiental da RH II Guandu, apesar da parte central da RH II Guandu estar desprovida de cobertura vegetal em sua maior parte, áreas importantes como cabeceiras de rios ainda possuem parte significativa de sua cobertura original. De acordo com o Comitê Guandu (2018) e Ferraz et al. (2019), existem registradas 54 Unidades de Conservação (UC): 11 federais, 20 estaduais e 23 municipais. Destas, 41 são de Uso Sustentável (categorias: Área de Proteção Ambiental (APP), Reserva Particular do Patrimônio Natural (RPPN) e Floresta Nacional) e 13 de Proteção Integral (categorias: Reserva Biológica, Refúgio da Vida Silvestre e Parque), ocupando, respectivamente, 1323 km² (36% do território) e 489,19 km² (13% do território) (Figura 2).

Figura 2 - Unidades de conservação na Região Hidrológica II

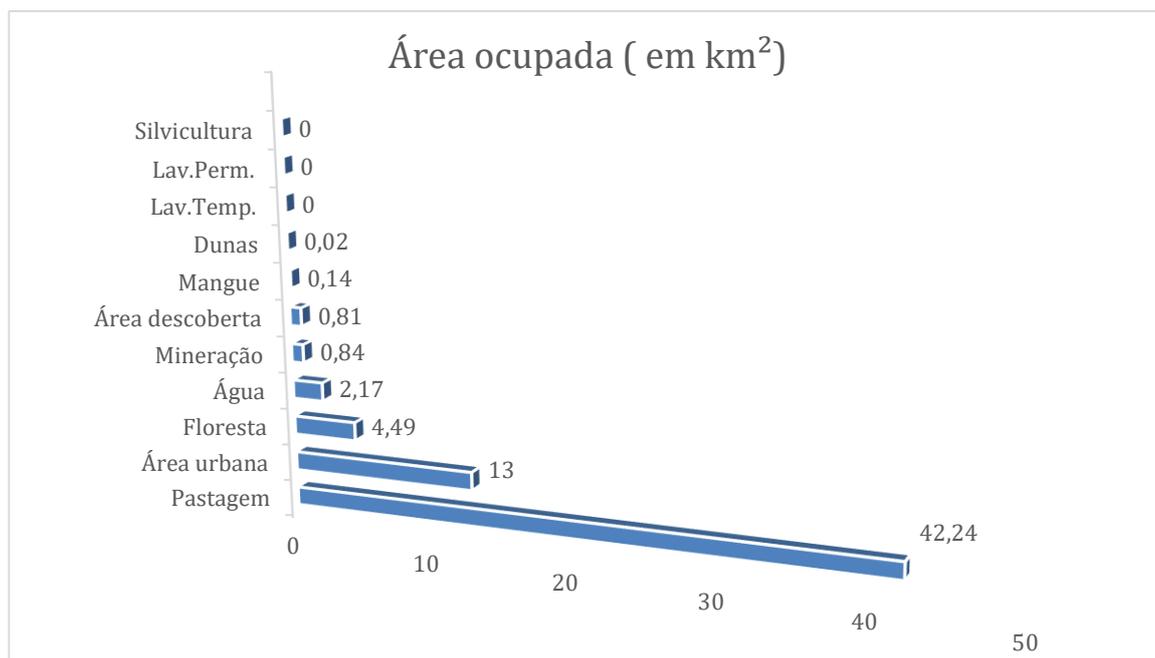


Fonte: Comitê Guandu, 2018, p. 25.

O uso do solo na região tem predomínio de pastagens e florestas, seguido de diferentes graus de ocupação urbana, predominando média e baixa densidade. O uso agrícola é pouco expressivo, porém existente, concentrados principalmente nos municípios de Queimados, Seropédica, Nova Iguaçu e Itaguaí (COMITÊ GUANDU, 2018). A cobertura vegetal se apresenta na forma de fragmentos de diversos tamanhos e estágios sucessionais da Mata Atlântica, situados quase que exclusivamente nos topos e encostas das serras, raramente alcançando as margens dos rios nos trechos de baixada (COMITÊ GUANDU, 2018).

No que se refere aos diferentes usos e ocupação do solo, foi definido no Plano Estadual de Recursos Hídricos (PERH) do Guandu, 11 classes embasadas na metodologia do “Sistema de Classificação da Cobertura e do uso da Terra”, proposto pelo Manual Técnico do uso da Terra (IBGE, 2013). Dentre as 11 classes de uso e ocupação do solo mapeadas para a BHRG, cerca de 92% do total são ocupadas por apenas três classes de uso, sendo: floresta, pastagem e área urbana. A figura 3 ilustra a distribuição destas classes em cada Unidade Hidrológica de Planejamento (UHP) (AGEVAP, 2016).

Figura 3 – Área, em km², ocupada por diferentes classes de uso do solo na UHP do rio Guandu.



Fonte: Adaptado de AGEVAP, 2016.

Na Área de Preservação Permanente (APP) do rio Guandu, foram definidas nove classes de uso da terra, sendo elas: agricultura, capoeira, mangue, restinga, mata, pastagem, solo exposto, urbano industrial e várzea, conforme descrito na Tabela 1 (IBGE, 2013). A mata ciliar na nessa área encontra-se bastante reduzida, onde os remanescentes representaram somente 20,2 % do total de 934,4 ha da área total da APP do rio Guandu, sendo que apenas 7,4% equivalem a florestas em estágio médio a avançado de sucessão (mata), e o restante (4,2%) corresponde a florestas em estágios iniciais de regeneração (capoeira).

As classes de uso do solo relacionadas ao uso antrópico, totalizaram 67,5% da APP (pastagem, agricultura e urbano-industrial), sendo a pastagem o uso mais expressivo (Tabela 1). Em outros estudos de levantamento do uso de solo em bacias hidrográficas, a pastagem também foi a classe de uso mais representativa (NASCIMENTO et al., 2006; SALAMENE et al, 2012). As lagoas e trechos de rios, por não se tratar de uso de solo não foram mencionadas, porém foram somadas no total da APP correspondendo a 5,83 ha ou seja 0,6% da área.

Tabela 1 - Uso da terra na área de preservação permanente do rio Guandu, RJ.

Uso da Terra	Área		Perímetro	
	(ha)	(%)	(m)	(%)
Pastagem	357,69	38,3	131.755	33,5
Agricultura	165,61	17,7	55.390	14,1
Urbano-Industrial	107,95	11,5	37.092	9,4
Várzea	102,98	11,0	45.548	11,6
Solo exposto	69,96	7,5	36.004	9,2
Mata	69,08	7,4	48.639	12,4
Capoeira	39,42	4,2	26.016	6,6
Mangue	10,93	1,2	3.975	1,0
Restinga	4,96	0,5	3.044	0,8
Total	934,40	100	393.045	100

Fonte: Adaptado de SALAMENE et al., 2012.

No que se refere a cidade do Rio de Janeiro, o rio Guandu é peça central para sua manutenção e desenvolvimento, uma vez que não há nenhum outro rio com capacidade hídrica suficiente para substituí-lo, sendo de suma importância o monitoramento da qualidade da água do manancial, para garantir o abastecimento de água que após tratamento deve estar em conformidade com os parâmetros hídricos que constam na Portaria de Consolidação nº 888 de 04 de maio de 2021, o chamado padrão de potabilidade. No entanto, tal monitoramento há muitos anos vem sendo negligenciado pela concessionária responsável pelo tratamento e abastecimento de água para a população da região metropolitana do Rio de Janeiro (BRASIL, 2021; PAULA, 2022).

2.2. Compostos e poluentes: origens e consequências

As substâncias, de origem natural ou sintética, quando são suspeitas de produzirem efeitos adversos, mas não estão inseridas em programas de monitoramento oficial, são denominadas contaminantes emergentes (CE) ou poluentes de preocupação emergente. Estes compostos são encontrados em concentrações traço, dificultando a análise de seus efeitos à saúde. São exemplos de contaminantes emergentes: agrotóxicos, fármacos, hormônios, produtos de higiene pessoal, microplásticos, entre outros (VARGAS, 2016; ANA, 2022).

O uso de agrotóxicos começou a se popularizar em 1941 com o DDT, famoso agroquímico que era rotulado como poderoso no controle de pragas na agricultura. Divulgado como de baixo custo e altamente eficiente, a população começou a utilizá-lo em larga escala, antes que os resultados das pesquisas sobre seus efeitos nocivos fossem publicados. Contudo, com seu grande sucesso, outros agroquímicos foram criados com intuito de combater diferentes

pragas e alavancar ainda mais a produção, fortalecendo a grande indústria dos agrotóxicos (PORTO; SOARES, 2012).

Em 1943, houve a introdução de agrotóxicos organossintéticos no Brasil, quando chegaram as primeiras amostras de DDT, criando uma revolução e aumento exponencial na produção e do consumo. A demanda anual de agrotóxicos no Brasil tem sido superior a 300 mil toneladas de produtos comerciais. Porém, segundo Silva et al. (2017), o aumento do consumo não é proporcional ao crescimento da área plantada, uma vez que o consumo de agrotóxicos cresceu 700% nos últimos quarenta anos, enquanto a área agrícola aumentou 78% neste mesmo período. Fato este que denota a exacerbada utilização destes agroquímicos.

O Estado foi o principal incentivador da utilização de agrotóxicos no país como pacote tecnológico quando atrelava a liberação de créditos rurais à compra destes compostos, pois nessa época, utilizar agrotóxicos em larga escala aumentando a produção era a representação de “modernidade”, pautada pela “revolução verde”, tornando, assim, o Brasil um dos países mais importantes para a indústria dos agrotóxicos no mundo (FAO; IFA, 1999; VARGAS, 2016). Em síntese, pode-se afirmar que o emprego dos agrotóxicos sem precedentes na atividade agrícola se deve em grande parte ao forte incentivo estatal à indústria e aos produtores rurais (PIGNATI, 2018).

Atualmente, o uso incorreto de agrotóxicos sem os devidos cuidados com concentração, modo de aplicação e manipulação, tanto na área urbana quanto na rural, é responsável por diversos problemas ambientais e para saúde humana, devido ao fato de serem substâncias, na maioria das vezes, altamente tóxicas, persistentes e móveis no solo, na água e ar (WHO, 2016; SILVA *et al.*, 2017).

São duas as principais formas de exposição aos agrotóxicos: o contato direto, seja no preparo, aplicação ou outro tipo de manipulação durante a cadeia produtiva, ou indireto, por meio do contato com águas, solo, atmosfera, alimentos contaminados ou mesmo pelo leite materno (BRASIL, 2013; RISTOW *et al.*, 2020; FROTA & SIQUEIRA, 2021). Frota & Siqueira (2021) Estimam que aproximadamente 7 kg de agrotóxicos são consumidos por cada brasileiro anualmente.

Pesquisas desenvolvidas pela Associação Brasileira de Saúde Coletiva (ABRASCO) e Ministério da Saúde – Fundação Oswaldo Cruz mostram que agrotóxicos podem causar várias doenças, como problemas neurológicos, motores e mentais, distúrbios de comportamento, problemas na produção de hormônios sexuais, infertilidade, puberdade precoce, má formação fetal, aborto, doença de Parkinson, endometriose, atrofia dos testículos e câncer de variados tipos (ANVISA, 2019).

No que concerne aos impactos sobre o meio ambiente e surgimento de problemas crônicos, os agrotóxicos merecem destaque, uma vez que 99% dos agrotóxicos aplicados na lavoura não atingem a praga alvo, além de irem para os rios, solo, ar e água subterrânea (RIGOTTO, 2009; PIGNATI, 2018; LAP et al, 2023). Quando aplicados por pulverizadores ou aviões, os agrotóxicos podem atingir longas distâncias sendo transportados pelo vento, atingindo rios, lagos e lençóis freáticos, áreas e seres vivos não alvos (PIGNATI, 2018).

Uma vez no solo, o agrotóxico pode sofrer transformações químicas e biológicas, reduzir a microbiota do solo e/ou ainda ser absorvido pelas plantas (VARGAS, 2016). Silva et al (2017) classificam o potencial de contaminação das águas superficiais por esses agrotóxicos, de acordo com o tipo de transporte do composto no solo, que é associado ao sedimento e/ou dissolvido em água. O Quadro 1 apresenta o potencial de contaminação de alguns agrotóxicos presentes na Portaria de consolidação nº 888/2021, que trata das normas e procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade (BRASIL, 2021).

Quadro 1 -Classificação de alguns agrotóxicos, presentes na portaria PRC MS nº 888/2021, quanto ao potencial de transporte associado ao sedimento e dissolução em água.

Agrotóxico	Tipo de transporte	
	Associado a sedimento	Dissolvido em água
Tebuconazol	Alto	Baixo
Diuron	Não determinado	Alto
Glifosato	Não determinado	Alto
Mancozebe	Não determinado	Alto

Fonte: Adaptado de SILVA *et al.*, 2017.

Por serem solúveis em água, os agrotóxicos Diuron, Glifosato e Mancozebe apresentam elevado potencial de contaminação das águas superficiais, apresentando riscos de contaminação dos mananciais (SILVA *et al.*, 2017).

A água poluída com agrotóxicos prejudica direta e indiretamente a fauna e a flora aquática, como, por exemplo, a redução de plantas aquáticas diretamente, caso seja um herbicida, e provoca um aumento de microrganismos decompositores, levando a redução do oxigênio dissolvido, causando indiretamente a morte de pequenos peixes (CAMPOS, 2019).

Ao serem transportados pelas águas superficiais, esses compostos percorrem extensas trajetórias caminhos ao longo dos cursos d'água até atingirem os oceanos, integrando-se assim ao ciclo natural da água. Contudo, análises em geleiras polares revelam a presença de DDT no gelo, composto proibido em diversos países desde a década de 1970, inclusive no Brasil a partir de maio de 2009. Esses achados destacam a importância de um controle e monitoramento mais rigorosos, uma vez que os impactos não se limitam apenas a níveis locais, mas têm também implicações globais (ALCÂNTARA et al., 2019).

2.3. Objetivos do Desenvolvimento Sustentável e os serviços ecossistêmicos

O desenvolvimento sustentável pode ser definido como o desenvolvimento que respeita a capacidade de produção dos ecossistemas e conseqüentemente melhora a qualidade da vida do homem na Terra. Sendo assim, uma sociedade sustentável é aquela que não coloca em risco os elementos do meio ambiente (MIKHAILOVA, 2004).

Diante da demanda de alcançar o desenvolvimento sustentável, a Organização das Nações Unidas (ONU) organizou um documento consensual, em agosto de 2015, entre os seus Estados-membros, durante a Assembleia Geral das Nações Unidas (AGNU), que propõe 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) e 169 metas correspondentes. Os ODS, apresentados na Figura 4, são o cerne da Agenda 2030 e sua implementação deve ocorrer no período 2016-2030 (BRASIL, 2022).

Ferraz et al. (2019) destacam a importância fundamental de um equilíbrio entre o uso de recursos naturais para o desenvolvimento socioeconômico e a conservação dos serviços providos pelos ecossistemas para o bem-estar social, para assegurar sobrevivência da humanidade e preservar o meio ambiente. É essencial compreender como a manutenção e restauração dos serviços ecossistêmicos contribuem diretamente para atingir esses ODSs. A interconexão entre os diferentes ODSs destaca a necessidade de abordagens também integradas, onde a preservação ambiental não é vista isoladamente, mas como parte do desenvolvimento sustentável. Os ODS devem integrar os valores dos ecossistemas nos processos de planejamento, desenvolvimento e definição de estratégias para a redução da pobreza e isso exige participação de todos os setores da sociedade: governo, setor privado, comunidades e organizações não governamentais

Figura 4 - Objetivos de desenvolvimento sustentável.



Fonte: Brasil, 2022.

O cenário atual exige uma gestão que considere os diversos aspectos econômicos, sociais e ambientais, o que vem favorecendo o fortalecimento de uma nova estratégia de gestão em recursos ambientais: o pagamento por serviços ambientais (PSA) (FUGÈRE et al, 2016; VIEIRA & RIBEIRO, 2022).

Entende-se por PSA as transferências financeiras de beneficiários de serviços ambientais para os que, devido a práticas que conservam a natureza, fornecem esses serviços, de forma segura e bem definida, por meio de uma transação voluntária (HECKEN & BASTIAENSEN, 2010; CALMON, 2021; MATOMELA et al, 2021; RAMOS, 2021).

Nos últimos anos, tem-se vivenciado uma ampla exploração de diferentes mecanismos nos quais os beneficiários dos serviços ambientais buscam compensar os provedores. Essa compensação visa cobrir os custos de oportunidade associados à restrição de uso dos recursos naturais. A internalização dos benefícios ambientais vem assumindo um papel de incentivo às comunidades locais e aos produtores rurais que, efetivamente, apresentam condições de proteger esses recursos naturais (PETHERAM & CAMPBELL, 2010; VARGAS, 2016; RAITIF et al, 2018; NCUBE et al, 2021).

A água é cada vez mais um recurso estratégico em função dos interesses vitais, econômicos e geopolíticos que somado ao aumento da degradação ambiental a crescente demanda de água em múltiplos setores, aumenta a necessidade de repensar as políticas públicas, principalmente no que se refere aos instrumentos de gestão ambiental.

A provisão de água em qualidade e regularidade apropriada para consumo humano a partir de mananciais protegidos é um dos serviços ambientais essenciais. No entanto, o impacto do desmatamento sobre os fluxos hídricos é uma grande preocupação. A erosão, e o consequente processo de sedimentação, quando ocorrem em níveis elevados geram uma série de impactos econômicos, sociais e ambientais, cujos custos são assumidos não apenas por um setor, mas por toda a sociedade (ESCOBAR & CARVALHO-SANTOS, 2022).

Nesse sentido, os dados no Brasil são alarmantes, como demonstrado a seguir: as perdas anuais de solo, em áreas agrícolas brasileiras, são da ordem de 822,7 milhões de toneladas, as quais estão associadas a uma perda econômica, no âmbito da propriedade rural, de US\$ 2,93 bilhões por ano. Porém, quando se consideram os prejuízos externos à propriedade rural, a erosão pode provocar um prejuízo total ainda maior, de aproximadamente US\$ 4,24 bilhões por ano, referente aos custos relativos à reposição de corretivos e fertilizantes, à menor produtividade, ao tratamento de água, à manutenção de estradas, dentre outros (HECKEN & BASTIAENSEN, 2010; PETHERAM & CAMPBELL, 2010; VIEIRA & RIBEIRO, 2022).

Quando se trata de PSA em recursos hídricos, os mercados de proteção das bacias hidrográficas não têm como objetivo direto a comercialização da água, portanto a preocupação com a qualidade ou quantidade desta, pois, embora haja inúmeros estudos sobre a relação direta entre floresta e água, é muito difícil quantificar esses serviços de forma exata (DUSABE et al, 2017; LAUREAU et al, 2017). Contudo, de forma geral, considera-se que a presença da cobertura vegetal exerce influência direta sobre a redução das cargas de sedimentos nas vias fluviais, o que reduz os processos de sedimentação (WHO, 2017; LAFAGE et al, 2019). Também exerce influência na regulação do ciclo hídrico, o que reduz tanto o risco de enchente na temporada chuvosa, quanto a probabilidade de escassez de água na temporada da seca, além de melhorar a qualidade de água disponível para o consumo doméstico. Portanto, partindo desse princípio geral, ao se propor um projeto de PSA visando os recursos hídricos, o que se torna valorizado é o uso do solo, que passa a ser considerado gerador de serviços de água (DUSABE et al, 2017; LAUREAU et al, 2017; ESCOBAR & CARVALHO-SANTOS, 2022).

O termo Serviços Ecossistêmicos (SE) diz respeito aos benefícios diretos e indiretos que podem ser obtidos dos ecossistemas naturais por meio de melhoramentos e auxílios complexos que um ecossistema íntegro e sem distúrbios pode oferecer para diversas atividades (NCUBE

et al, 2021), por exemplo, para a agricultura. É preciso ressaltar que tais serviços são gratuitos, pois são desempenhados naturalmente por seres vivos, como bactérias, fungos, invertebrados do solo, insetos etc.

A partir de levantamento bibliográfico, incluindo um dos primeiros trabalhos científicos a respeito do termo SE (EHRlich; MOONEY, 1983), Nahlik et al. (2012) reuniram diferentes definições para o termo, com o objetivo de encontrar um consenso, como segue:

Serviços Ecossistêmicos são “[...] os benefícios que as populações humanas derivam, direta ou indiretamente, das funções do ecossistema” (COSTANZA et al., 1997), “[...] o conjunto de funções do ecossistema que é útil para os humanos”. (KREMEN, 2005), “[...] uma gama de bens e serviços gerados por ecossistemas que são importantes para o bem-estar humano”. (NELSON et al., 2009) e “[...] benefícios que os humanos reconhecem como obtidos de ecossistemas que apoiam, direta ou indiretamente, sua sobrevivência e qualidade de vida” (HARRINGTON et al., 2010).

Diante das diferentes definições apresentadas, fica evidente que o conceito de serviços ecossistêmicos é complexo e abrange os elementos ambientais, humanos e econômicos (DARLEY; WIDMARK, 2016; DUSABE et al, 2017). Em outras palavras, serviços ecossistêmicos são todos aqueles que a natureza oferece gratuitamente e que fundamentalmente funcionam para manter o equilíbrio da natureza e dos seres vivos presentes no ecossistema, incluindo o ser humano.

De acordo com a Millennium Ecosystem Assessment (MEA), realizada em 2005, os serviços ecossistêmicos são divididos em quatro categorias: provisão, regulação, suporte e cultural (Figura 5) (MEA, 2005; FERRAZ et al, 2019).

Figura 5 - Categorias dos serviços ecossistêmicos de acordo com Millennium Ecosystem Assessment (MEA).



Fonte: FERRAZ et al., 2019

Como exemplos de serviços ecossistêmicos de provisão tem-se a produção de alimentos, fibras, recursos genéticos, bioquímicos e ornamentais, além da água potável. Já nos serviços de regulação tem-se a qualidade do ar, do clima, da água, controle da erosão, das doenças e pragas, a polinização, a purificação da água e o tratamento de resíduos, dentre outros. São exemplos de serviços de suporte, também chamados de processos ou funções, a formação do solo, a fotossíntese, a produção primária e a ciclagem de nutrientes e da água. Por último, os culturais são os valores espirituais e religiosos, sistemas de conhecimento, valores educacionais e estéticos, recreação e ecoturismo, por exemplo. Portanto, quando se fala em serviços ecossistêmicos, trata-se de transdisciplinaridade, ou seja, eles permeiam diversas áreas do conhecimento, como a ecologia, a economia, a política, a genética, a química e outras (RICKSON et al., 2015; FERRAZ et al., 2019; SCHOGGL et al., 2020).

Demonstrando a importância dos serviços ecossistêmicos, a figura 6 apresenta uma estimativa de monetização ou valoração de cada um desses serviços. Sendo assim, caso tais serviços já não existissem de forma natural, o ser humano precisaria provê-lo, com grandes gastos financeiros, ou, então, sem esse serviço ecossistêmico ocorreria o colapso de muitas

funções naturais na natureza, acarretando prejuízos imensuráveis à várias atividades econômicas, como na agricultura, por exemplo.

Figura 6 - Estimativa de valoração de alguns serviços ecossistêmicos



Fonte: Adaptado de Nahlik et al. (2012)

No entanto, ainda que incontestável a importância dos serviços ecossistêmicos, pode-se observar que mesmo dentro da agricultura moderna e altamente tecnológica, como o agronegócio, utilizam-se convencionalmente sistemas de manejo que vão diretamente em oposição a tais serviços essenciais. Enquadram-se, aqui os fertilizantes sintéticos e inúmeros tipos de agrotóxicos que atuam como grandes colaboradores da agricultura, mas que, em contrapartida, causam o desaparecimento da maioria dos microrganismos e da mesofauna que habitam o solo. Sendo assim, considerando este manejo ainda empregado atualmente, é fato que, em poucos anos, os solos que ainda resistem e se mantêm férteis e produtivos tendem a ficar degradados e cada vez mais dependentes da introdução de insumos industriais também e isso convém até mais às indústrias, do que à própria agricultura. Todavia, independentemente de quem se beneficia mais ou menos, fato é que os recursos naturais são os mais prejudicados, de forma indiscriminada e, provavelmente, irreversível. Se ainda recuperável, um solo

degradado leva anos para ser novamente útil na agricultura, tendo que ser recuperado por meios biológicos antes que possa ser cultivado, utilizando as metodologias que mantenham os ecossistemas, bem como os agroecossistemas com altas produtividades (DUSABE et al, 2017; SCHOENMAKERE et al., 2018; SCHOGGL et al., 2020).

Segundo Rickson et al. (2015), dois bilhões de hectares de solos e terrenos sob diferentes usos são anualmente degradados no globo terrestre por meio da ação humana. No Brasil, calcula-se que 12 milhões de hectares de solos agrícolas são degradados por ano, sendo que a grande quantidade de solos degradados de pastagens antigas e abandonadas, se for recuperada com métodos biológicos, abrir-se-ão grandes áreas, suficientes para a expansão da agricultura e da pecuária, fazendo com que não haja nenhuma necessidade de desmatamento ou queima de florestas para tal proposta.

Dentro dessa perspectiva, nos últimos anos tem crescido o número de trabalhos que tratam da economia circular e da bioeconomia (SCHOGGL et al, 2020). Entende-se por economia circular uma economia restauradora e regenerativa, a qual objetiva manter a utilidade dos produtos, componentes e matérias (RAITIF et al, 2018; LAP et al, 2023). A bioeconomia, por sua vez, abrange a produção de recursos biológicos renováveis e sua conversão em alimentos, rações, produtos de base biológica e bioenergética. Incluem-se na bioeconomia: a agricultura, a silvicultura, a pesca, a produção de alimentos, de celulose a papel, bem como de parte das indústrias química, biotecnológica e energética (SCHOENMAKERE et al., 2018). Embora sejam abordagens diferentes, elas são complementares. Ambos os conceitos, economia circular e bioeconomia, tem em comum o fato de se basearem em recursos aprimorados com maior eficiência e menor emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) e, portanto, relacionados com os serviços ecossistêmicos (MacARTHUR et al., 2013; SCHOENMAKERE et al., 2018).

2.4. Geoprocessamento remoto: História, importância e utilização

A importância dos satélites vem aumentando dia a dia. As notícias globais, as comunicações telefônicas, a conectividade da internet e até mesmo as imagens utilizadas na previsão do tempo e no monitoramento de ambientes são alguns exemplos dos benefícios que podem ser obtidos pela aplicação das tecnologias de satélites (RODRIGUES, 2017).

A revolução do sensoriamento remoto teve início na década de 1970, com o lançamento dos satélites dedicados a observação de recursos naturais terrestres. Foi nesse período que vimos avanços significativos no desenvolvimento de foguetes lançadores de satélites, o que

possibilitou a colocação de satélites artificiais em órbita para diversas finalidades (SILVA & ZAIA, 19). Um dos programas mais importantes desenvolvidos foi o “Landsat”, da NASA (National Aeronautics and Space Administration), iniciado em 23 de julho de 1972 (PARANHOS-FILHO, 2008; ABREU; COUTINHO, 2014; WHO, 2017).

Reconhece-se o termo Sensoriamento Remoto como uma tecnologia que permite a obtenção de dados da superfície terrestre, através da captação e registro da energia refletida ou emitida da superfície terrestre por meio da detecção e medição quantitativa das respostas das interações da radiação eletromagnética com os materiais terrestres (FLORENZANO, 2002; MENESES & ALMEIDA, 2012). Novo (1998) enfatiza ainda que o Sensoriamento Remoto é a utilização de sensores para a aquisição de informações sobre objetos ou fenômenos sem que haja contato direto entre eles. Em outras palavras, é a tecnologia que permite obter imagens e outros tipos de dados, da superfície terrestre, através da captação e do registro da energia refletida ou emitida pela superfície (FLORENZANO, 2002; RODRIGUES, 2017).

Das várias contribuições do sensoriamento remoto, a detecção qualitativa e quantitativa da vegetação verde se constitui como uma das ferramentas mais importantes para o planejamento ambiental por meio de índices de vegetação (IV), pois ressaltam o comportamento espectral da vegetação, possibilitando distinguir diferentes tipos de cobertura e uso da terra (MOREIRA, 2003).

Por conta de sua grande extensão territorial e pelo processo de ocupação, é inviável determinar *in loco* as condicionantes naturais e antrópicas, e as suas consequências sobre os sistemas ecológicos na bacia hidrográfica do rio Guandu. O levantamento via geoprocessamento remoto, por meio de programas como QGIS, ARCGIS e MAPBIOMAS, é imprescindível para computar todas as informações necessárias de modo prático e confiável e rápido e assim permitir a melhor elaboração de técnicas e métodos para proteção e recuperação do meio ambiente (PRUDENTE; ROSA, 2007; WHO, 2017; SILVA & ZAIA, 2019).

2.5. Qualidade da água: do manancial ao saneamento básico no Brasil

As atividades antrópicas no processo de ocupação do ambiente são responsáveis pela qualidade de vida de sua população. Essa condição pode ser observada na formação e desenvolvimento das cidades entrecortadas por corpos d’água superficiais. A existência de água sempre foi um pré-requisito para o surgimento e desenvolvimento das cidades ao longo de toda

história do homem (PORTO; FERREIRA, 2012). A história das cidades muitas vezes se confunde com a história do próprio rio que a entrecorta, em que corpo hídrico (natural) e construções (artificial) compõem a paisagem urbana (SAKAI; FROTA, 2014).

O usufruto das riquezas hídricas, de um modo geral, promove a redução da pobreza, o crescimento econômico e a sustentabilidade ambiental (UNESCO, 2015). Mas, embora esse ambiente se mostre tão importante para o progresso de uma população, o ser humano insiste em explorá-lo de forma predatória. Os processos de adensamento demográfico e consolidação do estilo de vida urbano refletem essa tendência quando se observa a inserção dos rios urbanos nesses processos, que têm ocorrido sem planejamento ou com planejamento inadequado, sem controle do uso e ocupação do solo e implantação de infraestrutura adequada, gerando impactos nas águas superficiais (LAP et al, 2023). Esse comportamento reflete o comportamento imediatista, egoísta e ganancioso do ser humano, principalmente em relação às riquezas naturais. (ROSSI et al., 2012; LAUREAU et al, 2017). Além disso, a condição dos rios urbanos geralmente é tratada como um problema de saneamento, mesmo sendo essas riquezas naturais um patrimônio ambiental (MORAES et al., 2012).

A preocupação com a saúde ambiental e com a qualidade da água é imprescindível pois a água é um elemento essencial e indispensável à manutenção da vida, já que nenhum processo metabólico no organismo ocorre sem a sua ação direta ou indireta (MORAES, et al, 2012; LAUREAU et al, 2017).

Como a população tem consumido cada vez mais produtos industrializados, uma maior quantidade de substâncias nocivas na água também tem sido detectada, e, devido às possíveis consequências, têm fomentado a elaboração das legislações ambientais no Brasil e no mundo, como o Padrão de potabilidade da água cuja importância é imensurável para a manutenção da saúde dos consumidores. Todavia, é improvável contemplar nas legislações ambientais todas as substâncias que podem trazer algum risco à saúde, tendo em vista que a produção de novos produtos tem uma dinâmica muito maior do que a elucidação de seus efeitos prejudiciais por meio de avaliações toxicológicas e da velocidade de alteração das políticas públicas no Brasil (INCTAA, 2014, ANA 2022).

Os efeitos adversos desses poluentes podem ocorrer tanto em seres humanos quanto em animais, plantas e microrganismos, gerando efeito agudo e imediato, quando o organismo é exposto a grandes doses do poluente; e efeito crônico, quando a exposição ocorre com baixas doses do poluente, mas de maneira contínua a longo prazo (NOGUERA-OVIEDO; AGA, 2016; BRASIL, 2018; COMITÉ GUANDU, 2018; ANA, 2022).

A realidade atual encontrada em todo o Brasil, em especial no estado do Rio de Janeiro, em relação a preservação dos rios urbanos é, de modo geral, bastante preocupante. O percentual de tratamento do esgoto gerado nos municípios da RH II Guandu é baixo, pois todos os municípios estão abaixo da média praticada na Região Sudeste, sendo que o município do Rio de Janeiro tem índice de 44,5% do seu esgoto tratado, ficando um pouco acima da média brasileira de 42,7% (BRASIL, 2018). Em segundo lugar encontra-se Miguel Pereira, com apenas 27,5%, Piraí com 15,9%, Vassouras 3,8% e Nova Iguaçu com 0,1%. Todos os demais municípios (10) integrantes da RH II Guandu não possuem nenhum esgoto tratado (COMITÊ GUANDU, 2018).

Diversas pesquisas, segundo Hutton e Haller (2004), mostram uma correlação entre a falta de saneamento básico em zonas urbanas e a incidência de doenças relacionadas à água em sua população. Diante dessa condição, a universalização do acesso aos serviços públicos de saneamento básico, bem como o fortalecimento da institucionalidade da área podem contribuir com o aumento nos índices de atendimento, principalmente no tocante ao esgotamento sanitário (HUTTON; HALLER, 2004).

Ações como a do Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB) aprovadas pelo decreto nº 8.141 consistem no planejamento integrado para universalizar o saneamento básico nacional até 2033, com intuito de promover a salubridade ambiental e a saúde ambiental e pública, além da disciplina sanitária do uso e ocupação do solo urbano (MORAES et al., 2012; BRASIL, 2013).

Sobre a qualidade da água na bacia, foi definido pela Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) que o monitoramento dos cursos d'água de domínio do Estado é realizado pelo INEA. Para análise da qualidade da água na região Hidrográfica é utilizado o Índice de Qualidade da Água (IQA_{NSF}) (BRASIL, 1997; COMITÊ GUANDU, 2018).

Apesar da condição confortável em que se encontra o país em relação ao resto do mundo no que tange a disponibilidade de água doce em seu território (BRASIL, 2012), a ocupação densa e desordenada nas margens dos rios tem promovido uma degradação generalizada dos seus elementos naturais, devido principalmente ao lançamento nos rios de resíduos sólidos e de esgotos sanitários não tratados (NOGUERA-OVIEDO; AGA, 2016).

Apesar dos avanços legais no Brasil, ainda é possível observar situações de péssimas condições sanitárias em bacias hidrográficas urbanas, o que tem promovido processos de degradação dos elementos naturais nestes ambientes (VARGAS, 2016; LAP et al, 2023). O planejamento urbano territorial, ao longo do tempo, tem demonstrado um enfoque para a arquitetura, a moradia, a organização e a salubridade dos espaços em detrimento das

características e da capacidade suporte dos sistemas naturais, com destaque para os sistemas fluviais.

A partir deste cenário, as atividades econômicas nessas áreas urbanas diminuem, já que tanto instituições públicas quanto privadas não investem em localidades com condições precárias e sem estrutura adequada (PORTO; FERREIRA, 2012). Sem investimento e sem a atenção do governo local, os impactos tendem a aumentar, gerando um ciclo vicioso de degradação socioambiental (ALMEIDA; CORRÊA, 2012).

Outra problemática, não menos importante, relacionada aos rios urbanos refere-se ao abastecimento de água da população. Por mais que uma cidade possua corpos d'água suficientes para manter esse serviço para todos, as condições de poluição e a própria alteração do curso e da calha do rio são empecilhos para se utilizar a sua água. Com isso, o município precisa investir em captação e tratamento de água de mananciais cada vez mais distantes de seu centro urbano, gerando um ônus exorbitante para aqueles que pagam por essa água (PORTO; FERREIRA, 2012; NOGUERA-OVIEDO; AGA, 2016)

Além da problemática com o saneamento básico, o desenvolvimento industrial aumentou o número de substâncias dentro nos processos produtivos e, conseqüentemente, para o consumo humano. Dentre essas, muitas substâncias foram e ainda são utilizadas sem que se conheça quais efeitos podem causar aos seres vivos e ao meio ambiente e pode demorar muitos anos até que os efeitos adversos sejam identificados, prejudicando a sua correlação e o desenvolvimento de ações preventivas e/ou remediativas para reduzir suas conseqüências (VARGAS, 2016; NOGUERA-OVIEDO; AGA, 2016).

Conseqüentemente, este rápido avanço foi seguido por inúmeros impactos ambientais, direta e indiretamente, como extensas queimadas de florestas para criação de novas áreas de plantio, contaminação de água e solo por diferentes contaminantes, redução da microbiota, fauna e flora local, dentre outros impactos (ANVISA, 2018).

Sem dúvida, a ordenação do uso e ocupação do solo com base em planejamento deveria ser uma questão prioritária para a definição de uma política de gestão de riquezas hídricas (BRAGA, 2003). Porém, dentre todos os ambientes urbanos, o rio é o mais utilizado, ocupado, modificado, degradado, subjugado e negado, mesmo com políticas de gestão definidas (ALMEIDA; CORRÊA, 2012). Essa negação refere-se não só ao ambiente em si, mas também àqueles que vivem no seu entorno, em sua maioria populações de baixa renda, sendo uma problemática característica de países em desenvolvimento, como o Brasil (ALMEIDA; CORRÊA, 2012).

2.6. Ecotoxicidade: Uma importante ferramenta para o meio ambiente

A disseminação de produtos químicos no meio ambiente tem sido uma fonte crescente de preocupação devido aos seus efeitos adversos. Desde pesticidas agrícolas até produtos químicos industriais, essas e outras substâncias podem causar danos significativos aos ecossistemas terrestres e aquáticos. A poluição resultante pode levar à contaminação de solos, águas subterrâneas e corpos d'água, afetando a saúde de plantas, animais e até mesmo seres humanos que dependem desses recursos naturais. Nesse contexto, a ecotoxicologia emerge como uma ferramenta vital para avaliar e mitigar os riscos associados à exposição a esses produtos químicos, oferecendo uma compreensão mais profunda dos impactos ambientais e orientando estratégias de gestão mais eficazes (LAUREAU et al, 2017; MEDEIROS, 2019).

A ecotoxicologia ao examinar os efeitos dos produtos químicos nos organismos e nos ecossistemas, desempenha um papel fundamental na proteção da saúde ambiental e na promoção da sustentabilidade. Utilizando abordagens interdisciplinares, essa disciplina. Ao integrar dados científicos robustos e metodologias avançadas de avaliação de risco, a ecotoxicologia, além de fornecer insights valiosos sobre os riscos potenciais para a vida animal e humana, habitats naturais e serviços ecossistêmicos essenciais, ainda capacita tomadores de decisão e formuladores de políticas a implementar medidas proativas para reduzir a exposição a produtos químicos prejudiciais e proteger a integridade dos ecossistemas. Assim, reconhecer e incorporar os princípios da ecotoxicologia no gerenciamento de riscos químicos é crucial para promover a coexistência sustentável entre a atividade humana e o meio ambiente.

Segundo Arenzon e Gerber (2011), toxicidade refere-se à capacidade de determinada substância, produto ou conjunto de substâncias provocarem efeitos danosos aos organismos com os quais entram em contato. Estes efeitos podem ser desde alterações comportamentais, alteração de crescimento ou reprodução até mesmo a morte dos organismos.

A toxicologia estuda os efeitos nocivos causados aos seres vivos através da toxicidade aguda e/ou crônica. A toxicidade aguda mede os efeitos de agentes tóxicos sobre espécies durante um curto período em relação ao período de vida do organismo-teste. Já a toxicidade crônica mede os efeitos de substâncias químicas sobre espécies por um período que pode abranger parte ou todo o ciclo de vida do organismo-teste. Em síntese, a toxicidade é a capacidade inerente de determinada substância química e/ou de seus metabólitos produzirem um efeito tóxico (SILVA, 2015; LAUREAU et al, 2017; BRASIL, 2018).

O objetivo dos ensaios de toxicidade é simular, em laboratório, os efeitos que poderiam ser observados nos organismos presentes no meio ambiente (ARENZON e GERBER, 2011; SILVA, 2015).

No geral, os organismos que podem ser utilizados nos ensaios de ecotoxicidade são de quatro níveis tróficos: os organismos produtores (algas), os consumidores primários (micro crustáceos), os consumidores secundários (peixes) e os decompositores (bactérias). Esses organismos são chamados de organismos-teste e são espécies mantidas em laboratório e cujos conhecimentos de sua biologia são suficientes para serem utilizados como indicadores de toxicidade. Tanto a forma de cultivo como as metodologias de ensaio para estes organismos são definidas em normas técnicas validadas, permitindo a reprodutibilidade dos resultados (BRASIL, 2011; SILVA, 2015; NOBREGA, SOUZA, MEDEIROS, 2019).

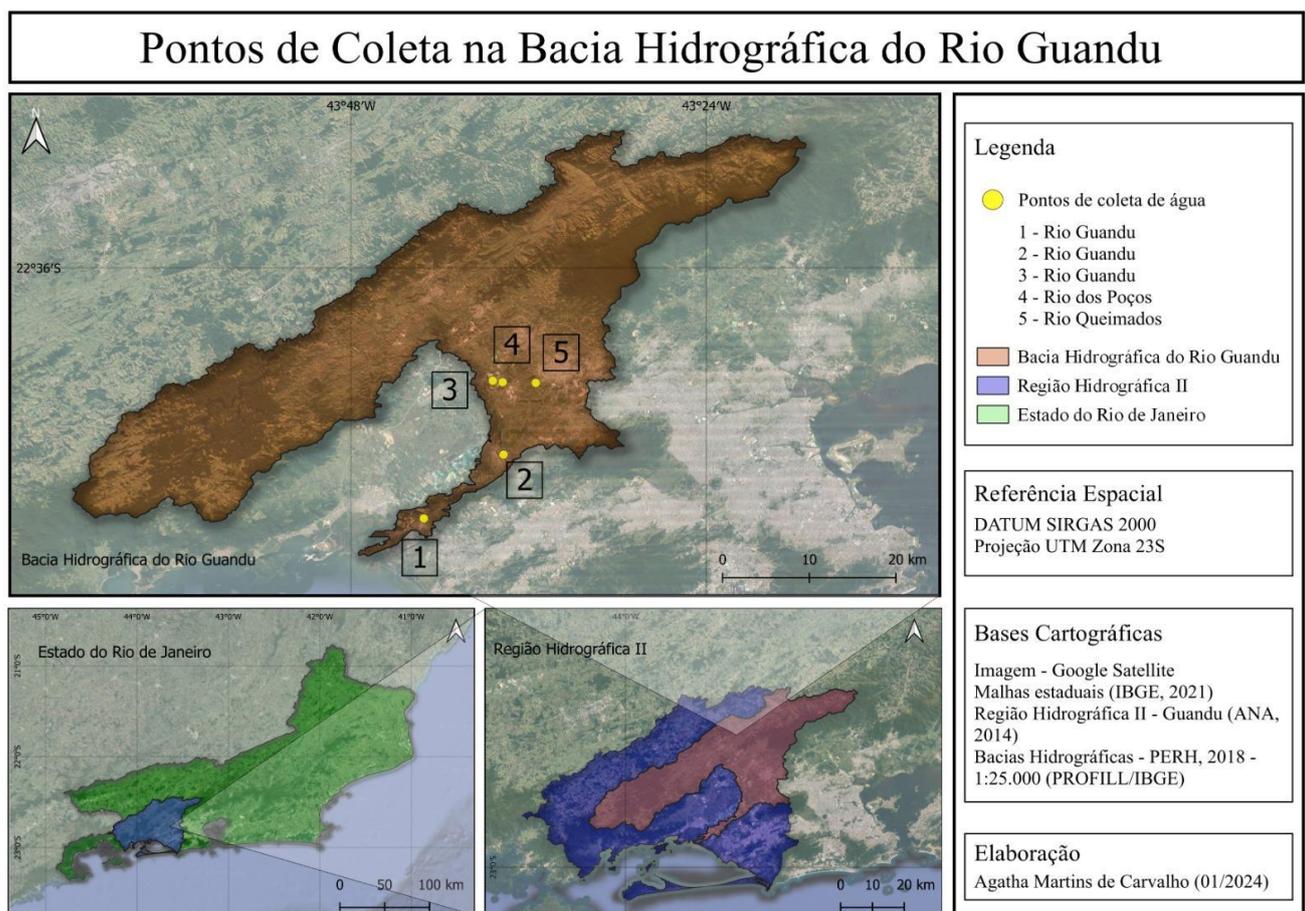
Vale ressaltar que o tratamento inadequado e/ou ausência de tratamento para efluentes líquidos (sanitários e/ou industriais) lançados em corpos hídricos, incluindo rios responsáveis pelo abastecimento de água, podem comprometer o provimento de água potável devido à contaminação das águas (LAUREAU et al, 2017; BRASIL, 2018; MEDEIROS, 2019). Para foram lançadas diversas resoluções de forma a controlar a qualidade do tratamento dos efluentes para posterior lançamento em cursos d'água. A Resolução CONAMA nº 430 (BRASIL, 2011) regula o lançamento de efluentes líquidos e exige que sejam realizados ensaios de toxicidade com, pelo menos, dois organismos de diferentes níveis tróficos.

3. METODOLOGIA

3.1. Caracterização da Área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Guandu está situada a oeste da bacia da Baía de Guanabara, sendo ampla tanto em seu alto curso quanto próximo à costa. Formada pelos rios Guandu, da Guarda e Guandu-Mirim, é contribuinte à Baía de Sepetiba, no Estado do Rio de Janeiro, e ocupa uma área de 3.600 km² (Figura 7). De acordo com a classificação dos solos, nessa região predomina-se dois tipos de solo: Argissolo vermelho amarelo e planossolo hidromórficos (PERH-GUANDU, 2006).

Figura 7 - Estimativa de valoração de alguns serviços ecossistêmicos



Fonte: O autor, 2023 (mapa elaborado baseado em acesso ao google Earth 2023)

3.2. Geoprocessamento remoto, levantamento de dados e escolha dos pontos de coleta da água

A metodologia empregada neste trabalho no que concerne ao geoprocessamento remoto foi efetuado em três fases: a preparação da base cartográfica, o processamento digital de imagens de sensoriamento remoto (que permitiu a geração do índice de Cobertura Vegetal e o Índice de Transformação Antrópica) e a escolha dos pontos de coleta da água para as análises subsequentes. Para tal demanda, foi empregado o programa ArcGIS, além da obtenção de shapefiles nos websites do IBGE, ANA e MapBiomias.

1 - Preparação da base cartográfica: o primeiro passo foi a definição da área de interesse com abrangência de toda a bacia hidrográfica do rio Guandu. Para a elaboração da base cartográfica, foram utilizadas como base a Carta do Brasil na escala 1:50000. Depois de limitar a área de estudo, foram definidas as categorias utilizadas para a construção do banco de dados e para a geração das cartas-imagem: hidrografia, hipsografia, localidades, obras e edificações e limites, sendo que as duas primeiras ainda foram utilizadas na geração do modelo numérico de terreno.

2 - Análise em microescala: com os resultados gerados e através do recorte de bacias, foram integrados os dados que permitiram a identificação das áreas que apresentam condições mais críticas, de acordo com os parâmetros abordados: cobertura vegetal, uso e cobertura do solo e a malha hídrica (Figura 7). Todos os mapas gerados com estes dados foram utilizados neste trabalho.

3 - Escolha dos pontos de coleta: os pontos de coleta foram escolhidos seguindo critérios e com o objetivo de responder as seguintes perguntas:

- Os municípios de Japeri, Queimados, Nova Iguaçu e Seropédica, com seus respectivos polos industriais e urbanos interferem negativamente na qualidade da água?
- Pela vasta ausência de mata ciliar, há o carreamento de agrotóxicos e outros poluentes para o Rio Guandu por meio do escoamento superficial?
- Os Rios dos Poços e Rio Queimados interferem negativamente na lagoa de estabilização da ETA Guandu ao se unir ao Rio Guandu?

Para responder tais perguntas, foram selecionados cinco pontos de coleta:

- 1º ponto (P1): Rodovia BR 101, Km 394, próximo ao Polo Industrial de Santa Cruz (rio Guandu). Foi escolhido esse ponto por ser próximo ao desagüe no mar, de fácil acesso e por haver uma vasta área agrícola em suas proximidades.
- 2º ponto (P2): Rodovia 465, na ponte da lagoinha, divisa de Seropédica com Nova Iguaçu (rio Guandu). Foi escolhido esse ponto por ser o mais próximo do local de captação da ETA Guandu, possuir fácil acesso, estar no meio do centro urbano e ser logo após a união do rio Guandu com o rio dos poços e rio queimados.
- 3º ponto (P3): Rodovia BR 116, Km 205 (rio Guandu), ponto logo após o município de Japeri. Foi escolhido por ser de fácil acesso, ser antes das cidades de Seropédica e Nova Iguaçu e antes do encontro com o rio queimado e rio dos poços. Este ponto foi o ponto norteador. Sendo assim, caso algum poluente seja encontrado nos pontos 1 e 2 e não no ponto 3, haverá um forte indício de sua possível origem.
- 4º ponto (P4): Rodovia BR 116, Km 204 (rio dos poços). Ponto escolhido por ser o único local de fácil e seguro acesso ao rio dos poços antes de sua união com o rio Guandu e rio queimados, sendo a união com esse último ocorrendo no meio do polo industrial de queimados.
- 5º ponto (P5): Rodovia BR 116, Km 200 (rio Queimados). Ponto escolhido por ser o local de mais fácil acesso ao rio Queimados antes de sua união com o rio Guandu e rio dos poços, sendo a união com esse último ocorrendo no meio do polo industrial de queimados.

3.3. Pluviometria da bacia hidrográfica do rio guandu

A fim de validar os dados relativos à qualidade da água, é importante entender os índices pluviométricos na BHRG, localizada no estado do Rio de Janeiro. Existem m diversas maneiras viáveis de obter séries históricas de pluviometria de acesso público e facilitado para esse local de estudo. Para essa pesquisa, foi utilizado o conjunto de dados disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Para a análise dos modelos foi decidido pelo uso do banco de dados do INMET referente à precipitação acumulada em períodos prévios de 72 h aos dias das coletas mensais realizadas no ano de 2023 entre os meses de janeiro e julho, nos dias 25/01, 01/03, 30/03, 13/04, 25/05, 11/07 e 18/07.

3.4. Parâmetros físico-químicos e biológicos

3.4.1. Oxigênio Dissolvido

O oxigênio dissolvido (OD) é essencial para os organismos aeróbios. Durante a estabilização da matéria orgânica, as bactérias fazem uso do oxigênio nos seus processos respiratórios, podendo reduzir a concentração dele no meio. Dependendo da magnitude deste fenômeno, diversos seres aquáticos podem morrer, inclusive os peixes. Ainda, caso o oxigênio seja totalmente consumido, tem-se a condição anaeróbia, com geração de maus odores. O OD é o principal parâmetro de caracterização da poluição das águas por despejos orgânicos (VON SPERLING, 2005). É uma variável ambiental clássica, e sua ausência pode afetar significativamente a biota aquática. Neste trabalho, a medida do parâmetro OD foi feita em campo em triplicata no ato da coleta com o auxílio de uma sonda multiparamétrica HORIBA, modelo U-52 (Figura 8).

Figura 8 - Mensuração do parâmetro OD realizada a campo a partir de amostra de água coletada da Ba-cia Hidrográfica do Rio Guandu



Fonte: O autor, 2023.

3.4.2. Coliformes termotolerantes / *E. Coli*

As bactérias do grupo coliforme são consideradas os principais indicadores de contaminação fecal. Tais organismos dão uma satisfatória indicação de quando a água apresenta contaminação por fezes humanas ou de animais e, por conseguinte, sua potencialidade para transmitir doenças (VON SPERLING, 2005). A determinação da concentração de coliformes assume importância como parâmetro indicador da possibilidade da existência de microrganismos patogênicos, responsáveis pela transmissão de doenças de veiculação hídrica (CETESB, 2015). Neste ponto há uma divergência: IQA-NFS considera em seus cálculos os coliformes termotolerantes (peso 0,16), enquanto o IQA-Cetesb considera o peso 0,15. Por conta de limitação de recursos, neste trabalho foi utilizado *Escherichia coli* para a mensuração do IQA, aplicando o fator de correção de 1,25 sobre o resultado de *E. coli* e utilizando o valor equivalente da curva de Coliformes Termotolerantes (CETESB, 2017).

A medição deste parâmetro é feita por filtração por membrana e incubação em estufa, seguindo o processo descrito pelo APHA (Figura 9) (APHA, 2005).

Figura 9 - Ensaio de E. coli realizado em laboratório a partir de amostra de água coletada da Bacia Hidrográfica do Rio Guandu.



Fonte: O autor, 2023.

3.4.3. pH

O pH é um importante parâmetro que, juntamente com outros, pode fornecer indícios do grau de poluição, metabolismo de comunidades ou ainda impactos em um ecossistema aquático. Vale destacar que a espécie química dominante dependerá do pH final do corpo d'água (determinado também pela existência de outros ácidos e bases), além das respectivas constantes de equilíbrio das reações (MARTINS et al, 2003). O IQA-NFS concede ao pH o peso 0,11, enquanto o IQA-Cetesb concede peso 0,12. A medida do parâmetro pH foi feita tanto em campo em triplicata no ato da coleta com o auxílio de uma sonda multiparamétrica HORIBA, modelo U-52 quanto em laboratório com o auxílio do phmetro digital Quimis, modelo Q400AS-90 para comparação e validação dos resultados, seguindo o processo descrito pelo APHA (Figura 10) (APHA, 2005).

Figura 10 - Mensuração do pH realizado em laboratório a partir de amostra de água coletada da Bacia Hidrográfica do Rio Guandu



Fonte: O autor, 2023.

3.4.4. Demanda Bioquímica por Oxigênio

A DBO de uma água é a quantidade de oxigênio necessária para oxidar a matéria orgânica por decomposição microbiana aeróbia para uma forma inorgânica estável. Os maiores aumentos em termos de DBO em um corpo hídrico são provocados por despejos de origem predominantemente orgânica. A presença de um alto teor de matéria orgânica pode induzir ao completo esgotamento do oxigênio na água, provocando um desequilíbrio na vida aquática (APHA, 2005; CETESB, 2015). O IQA-NFS concede ao DBO o peso 0,16, enquanto o IQA-Cetesb concede peso 0,15. A medição deste parâmetro é feita por titulometria com o auxílio do oxímetro Thermo Electron Corporation, Orion 3 star, seguindo o processo descrito pelo APHA (APHA, 2005).

3.4.5. Fósforo

O fósforo é um nutriente essencial para todas as formas de vida, pois é parte das estruturas celulares. Ele aparece em águas naturais devido principalmente as descargas de esgotos sanitários. Nestes, os detergentes constituem a principal fonte, além da própria matéria fecal, que é rica em proteínas. As águas drenadas em áreas agrícolas e urbanas também podem provocar a presença excessiva de fósforo em águas naturais (IAP, 2016). Por ser um elemento indispensável para o crescimento de algas, quando em elevadas concentrações, pode conduzir a um crescimento exagerado desses organismos, levando à eutrofização das águas naturais (CETESB, 2015). Neste ponto há uma divergência: IQA-NFS considera em seus cálculos o fósforo total (peso 0,10), enquanto o IQA-Cetesb considera os o fosfato total (peso 0,10). A medição deste parâmetro é feita por espectrofotometria, seguindo o processo descrito pelo APHA (APHA, 2005).

3.4.6. Nitrogênio

O nitrogênio é um constituinte de proteínas, clorofila e vários outros compostos biológicos. As fontes de contaminação desse composto em corpos d'água são de origem natural ou antropogênica, sendo a última a mais importante, pois é constituída por despejos domésticos e industriais, excrementos de animais e fertilizantes (VON SPERLING, 2005). O principal problema relacionado com altas concentrações de nitrogênio é a eutrofização. Esse elemento é indispensável para o crescimento de algas e, quando em elevadas concentrações em lagos e represas, principalmente, pode conduzir a um crescimento exagerado desses organismos, causando interferências aos usos desejáveis do corpo d'água (VON SPERLING, 2005), gerando problemas como gosto e odor, redução de oxigênio e transparência, declínio da pesca, mortandade de peixes, obstrução de cursos d'água e efeitos tóxicos sobre animais e seres humanos. Neste quesito há uma diferença: IQA-NFS considera em seus cálculos o nitrato (peso 0,10), enquanto o IQA-Cetesb considera o nitrogênio total (peso 0,10). A medição deste parâmetro é feita por titulometria, seguindo o processo descrito pelo APHA (APHA, 2005).

3.4.7. Turbidez

A Turbidez representa o grau de interferência com a passagem da luz através da água, conferindo uma aparência turva à mesma. A erosão das margens dos rios em estações chuvosas é um exemplo de fenômeno que resulta no aumento da turbidez das águas. Os esgotos sanitários e diversos efluentes também provocam elevações na turbidez das águas (IAP, 2015). A medida do parâmetro turbidez foi feita tanto em campo em triplicata no ato da coleta com o auxílio de uma sonda multiparamétrica HORIBA, modelo U-52 quanto em laboratório com o auxílio do turbidímetro digital de bancada para comparação e validação dos resultados seguindo o processo descrito pelo APHA (Figura 11) (APHA, 2005).

Figura 11 - Mensuração realizada em laboratório da turbidez de amostra de água coletada da Bacia Hidrográfica do Rio Guandu



Fonte: O autor, 2023.

3.4.8. Sólidos

Para os recursos hídricos, os sólidos podem causar danos aos peixes e à vida aquática. Eles podem sedimentar no leito do rio, destruindo organismos que fornecem alimentos, ou também danificar os leitos de desova de peixes. Os sólidos podem reter bactérias e resíduos orgânicos no fundo dos rios, promovendo decomposição anaeróbia (CETESB, 2015). Neste quesito há uma diferença: IQA-NFS considera em seus cálculos os sólidos totais em suspensão

(peso 0,07), enquanto o IQA-Cetesb considera o os sólidos totais (peso 0,08). A medição deste parâmetro é feita por gravimetria, seguindo o processo descrito pelo APHA (APHA, 2005).

3.4.9. Temperatura

A temperatura determina vários processos químicos, físicos e biológicos que ocorrem em um sistema aquático, tais como o metabolismo dos organismos e a degradação da matéria orgânica, e possui duas origens, quando relacionada como parâmetro de caracterização das águas. A importância da temperatura como parâmetro de qualidade da água é que as elevações da temperatura aumentam as taxas das reações química e biológicas, diminuem a solubilidade dos gases e aumentam a taxa de transferência dos mesmos, o que pode gerar mau cheiro, no caso da liberação de gases com odores desagradáveis (VON SPERLING, 2005). A medida do parâmetro temperatura foi feita em campo em triplicata no ato da coleta com o auxílio de uma sonda multiparamétrica HORIBA, modelo U-52 (Figura 12).

Figura 12 - Mensuração realizada em campo com o parâmetro temperatura em destaque



Fonte: O autor, 2023.

3.5. Índice de Qualidade de Água – IQA

As amostras de água foram coletadas uma vez por mês durante sete meses (de janeiro a julho de 2023) sempre nos mesmos cinco pontos (Figura 7), com exceção da coleta do dia 25/01 onde não coletado amostra no ponto 1, totalizando 34 amostras ambientais. Os atributos físicos, químicos e biológicos considerados neste estudo foram: *E. coli*, DBO, fósforo total, nitrato, OD, pH, sólidos totais dissolvidos, temperatura e turbidez (Quadro 2) para a mensuração do IQA-NSF e *E. coli*, DBO, fosfato, nitrogênio total, OD, pH, sólidos totais, temperatura e turbidez (Quadro 3) para a mensuração do IQA-CETESB.

Quadro 2 - Variáveis utilizadas e seus pesos relativos para cálculo do IQA-NFS

Variável	Unidade	Peso (w)
<i>E. coli</i>	UFC/100ml	0,16
DBO	mg/L O ₂	0,11
Fosfato total	mg/L	0,10
Nitratos	mg/L	0,10
Oxigênio Dissolvido	% Saturação	0,17
pH	-	0,11
Sólidos totais dissolvidos	mg/L	0,07
Temperatura	°C	0,10
Turbidez	uT ou NTU	0,08

Fonte: Adaptado de ANA, 2020.

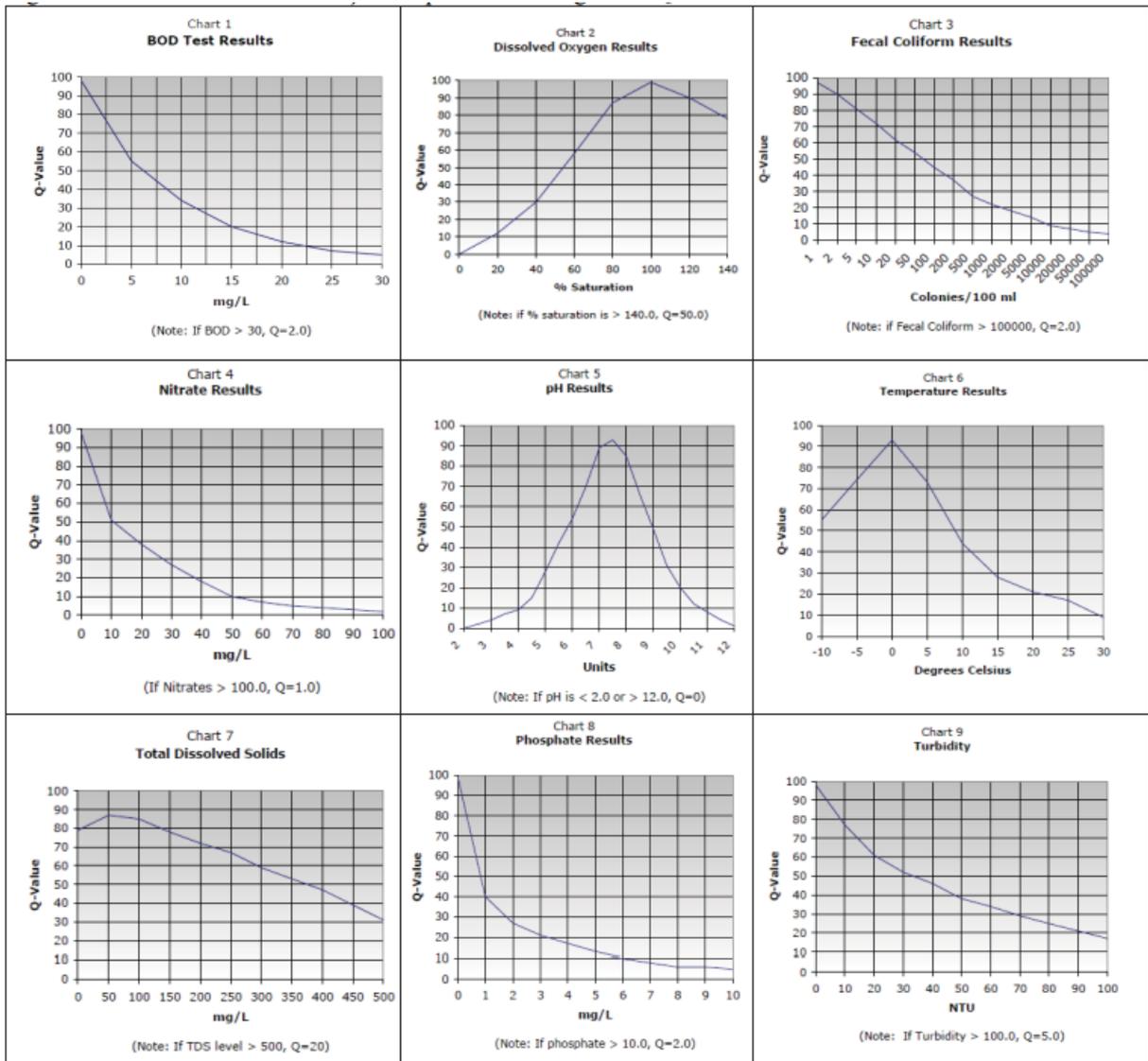
Quadro 3 - Variáveis utilizadas e seus pesos relativos para cálculo do IQA-CETESB

Variável	Unidade	Peso (w)
<i>E. coli</i>	UFC/100ml	0,15
DBO	mg/L O ₂	0,10
Fósforo total	mg/L	0,10
Nitrogênio total	mg/L	0,10
Oxigênio Dissolvido	% Saturação	0,17
pH	-	0,12
Sólidos totais	mg/L	0,08
Temperatura	°C	0,10
Turbidez	uT ou NTU	0,08

Fonte: Adaptado de CETESB, 2020.

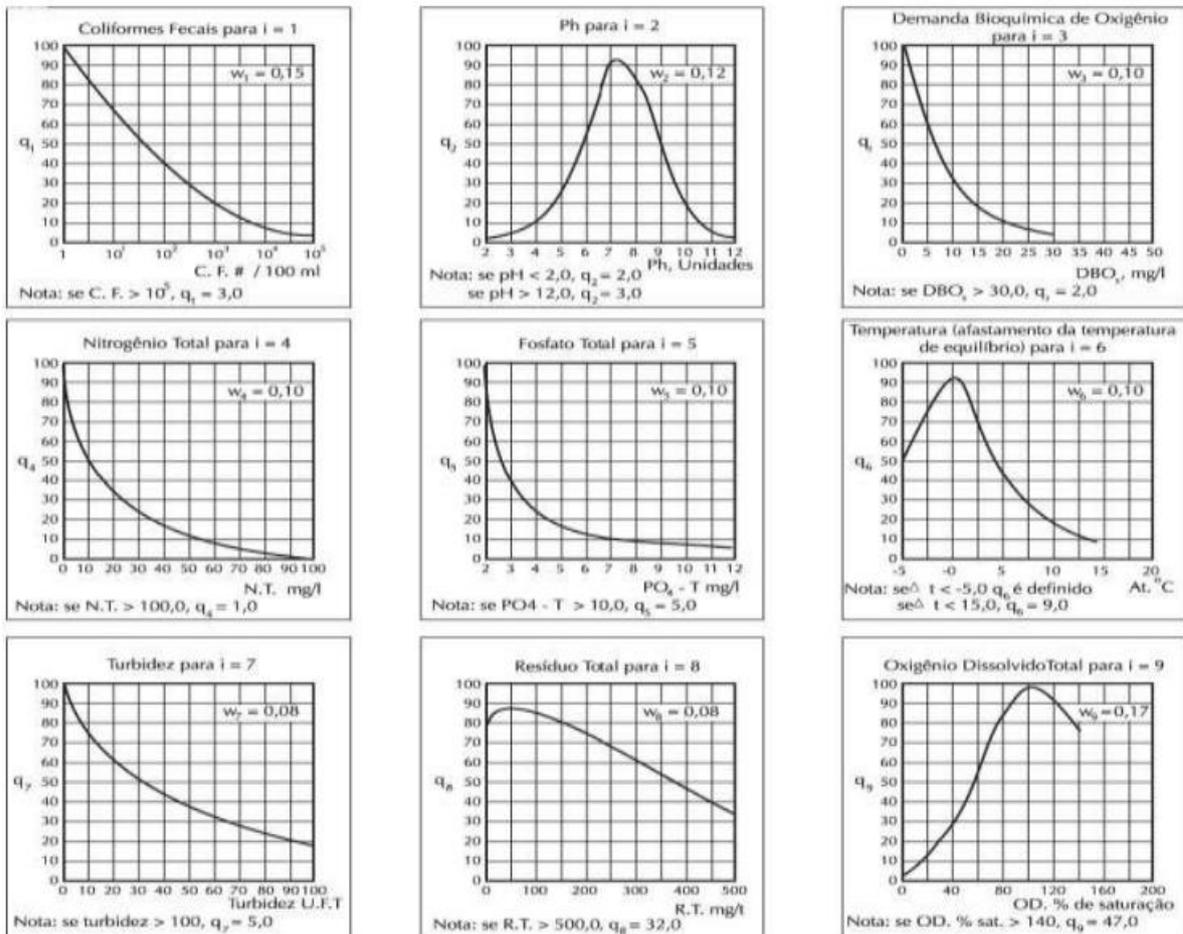
As análises das amostras de águas seguiram a metodologia apresentada por Apha (1998). Foram utilizados os pesos relativos - w_i e as curvas de qualidade - q_i do IQA-NSF (Figura 13) e do IQA-CETESB (Figura 14), que atribuem uma nota subjetiva de qualidade aos valores da variável analisada (Tabela 2).

Figura 13 - Curvas médias de variação de qualidade das águas do IQA-NSF



Fonte: ANA, 2020.

Figura 14 - Curvas médias de variação de qualidade das águas do IQA-Cetesb



Fonte: CETESB, 2020.

Os IQAs utilizados neste trabalho foram desenvolvidos pela National Sanitation Foundation (NSF) e pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). O Valor do IQA foi avaliado através da seguinte equação:

$$IQA = \prod_{i=1}^n q_i^{w_i}$$

na qual,

IQA = índice de qualidade de água (adimensional), um número entre 0 e 100,

∏ = multiplicatório,

qi = qualidade do parâmetro i obtido através da curva média específica da qualidade,

wi = peso atribuído a cada parâmetro, portanto:

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1$$

Em que:

n = número de parâmetros que entram no cálculo do IQA.

A partir do cálculo efetuado, foi determinada a qualidade das águas brutas, que é indicada pelo IQA, em uma escala de 0 a 100, representado na Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação da qualidade da água nas faixas de IQA-NSF e IQA-CETESB

Nível	Faixa de IQA-NSF	Faixa de IQA-CETESB
Excelente	90 < IQA = 100	80 < IQA = 100
Bom	70 < IQA = 90	52 < IQA = 80
Médio	50 < IQA = 70	37 < IQA = 52
Ruim	25 < IQA = 50	20 < IQA = 37
Muito Ruim	0 < IQA = 25	0 < IQA = 20

Fonte: Adaptado de ANA, 2020.

3.6. Ensaio de Agrotóxicos

A fim de identificar a presença de agrotóxicos na BHRG, foi realizado no dia 01/03/2023 coleta de campo nos cinco pontos analisados para a detecção de seis agrotóxicos, sendo Acetamiprido, Atrazina, Imidacloprido, Tiametoxam, Tiacloprido e Diuron. Os frascos de vidro na cor âmbar foram esterilizados utilizando detergente extran, Acetona PA e lavagem com água MilliQ e armazenadas em local livre de poeira e vapores. Após a coleta, nas amostras foram adicionadas gotas de solução 0,008% m/v de tiosulfato de sódio (para a redução de resíduos de cloreto), o pH foi ajustado para a faixa de 6 a 9 com NaOH e foram acondicionadas no escuro em refrigeradores a 4° C. 72h acondicionadas, as amostras foram entregues aos cuidados do laboratório de química do Instituto de química para detecção dos agrotóxicos por cromatografia.

3.7. Ensaio de ecotoxicidade

3.7.1. Ensaio de toxicidade crônica de *Raphidocelis subcapitata*

Os organismos testes utilizados foram: a microalga *Raphidocelis subcapitata* (unicelular de água doce) e a bactéria *Vibrio fischeri* (bactéria bioluminescente de água salgada). Estes organismos são bioindicadores padronizados para análises ecotoxicológicas e utilizados em larga escala por pesquisadores da área. A microalga *Raphidocelis subcapitata* (unicelular de água doce) foi cultivada em meio L.C. Oligo como instruiu a norma ABNT-BR 12.648 (ABNT, 2018), meio este que foi trocado semanalmente, mantendo o cultivo em fase de crescimento exponencial, o que é ideal para a aplicação de ensaios ecotoxicológicos. O cultivo foi mantido a 25 ± 2 °C, iluminação contínua e aerada constantemente com bombas de aquário.

Para o ensaio crônico com *R. subcapitata* foi seguido a norma ABNT-BR 12.648 (ABNT, 2018). Os testes foram realizados em placas de 24 poços para cultivo de células de 3,5 mL, na temperatura de 25 ± 2 °C, iluminação contínua, velocidade de agitação contínua entre 100 e 175 rpm, em quadruplicata e a partir de um inóculo de alga de 3×10^5 células/mL de *R. subcapitata*. Por serem amostras ambientais, neste teste não foram realizadas diluições. As

amostras foram enriquecidas com as soluções do meio de cultivo L. C. Oligo (ABNT, 2018) nas mesmas proporções do utilizado no controle. Ao final das 96 h de ensaio, as biomassas (densidade celular) das amostras foram obtidas através da leitura em microscópio. O ensaio foi considerado válido quando a biomassa algácea no controle foi, pelo menos, 100 vezes superior à inicial para 96 h e o coeficiente de variação da biomassa algácea final, entre as réplicas (quatro) do controle foram $\leq 20\%$ (Figura 15). Assim como nos ensaios para a mensuração do IQA, foram realizadas coletadas uma vez por mês durante sete meses (de janeiro a julho de 2023) sempre nos mesmos cinco pontos (Figura 7), com exceção da coleta do dia 25/01 onde não coletado amostra no ponto 1, totalizando 34 amostras ambientais.

Figura 15 - Ensaio de *Raphidocelis subcapitata* sendo realizado com placas de 24 poços, acondicionadas a temperatura, agitação e luminosidade controlada



Fonte: O autor, 2023.

3.7.2. Ensaio de toxicidade aguda de *Vibrio fischeri*

As bactérias *Vibrio fischeri* foram adquiridas na forma liofilizada da marca Biolux e mantidas à $-20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ até a sua utilização. Seguiu-se a Norma ABNT-BR 15.411-3/21 (ABNT, 2021). O ensaio foi procedido da hidratação da bactéria *Vibrio fischeri* (Biolux), utilizando 1000 μl de solução tampão de reativação. Após a hidratação das bactérias este material ficou armazenado no aparelho de leitura Microbioc (M500 Toxicity Analyzer) (Figura 16) a uma temperatura de $4^{\circ}\text{C} \pm 2$. Para se utilizar estas bactérias no ensaio, a mesma foi diluída na proporção 1000 μl de solução diluente salina para 100 μl de bactéria hidratada, permanecendo armazenada em outro compartimento a 15°C .

Por serem amostras ambientais, neste teste não foram realizadas diluições. As amostras foram salinizadas a 2% na mesma proporção da solução controle e todos os ensaios foram feitos em duplicata.

Nas cubetas de leitura foram adicionadas 100 μl de solução contendo as bactérias hidratadas e já diluídas na proporção 1:10 e feitas as leituras de bioluminescência inicial (I_0). Após este procedimento adicionou-se 900 μl das amostras em duplicata e foi realizado a leitura após cinco (I_5), quinze (I_{15}) e trinta minutos de exposição (I_{30}). Todo o ensaio foi feito com as amostras a temperatura de 15°C .

Os dados de I_0 , I_5 , I_{15} e I_{30} foram inseridos em uma planilha Excel que realiza o cálculo de toxicidade das amostras com base na redução de luminescência da bactéria (ABNT, 2021).

Figura 16 - Aparelho de Microbioc Microtox utilizado nos ensaios de toxicidade aguda de *Vibrio fischeri*



4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Resultados do Monitoramento e IQA

A utilização do índice de Qualidade de Água (IQA) foi inicialmente proposta por Horton (1965) e Brown et al. (1970). Desde então, diferentes métodos para o cálculo de IQA foram desenvolvidos, incluindo parâmetros físico químicos similares, porém com pesos diferentes. No Brasil, o IQA foi adaptado e desenvolvido primeiramente pela CETESB em 1975, a partir de um estudo realizado em 1970 pela NSF para avaliar a qualidade da água bruta objetivando seu uso para o abastecimento público após tratamento. Os parâmetros usados no cálculo são em sua maioria indicadores de contaminação causada pelo lançamento de esgotos domésticos. (ANA, 2020; CETESB, 2020)

Nas décadas seguintes, diferentes estados brasileiros adotaram um dos dois IQAs que melhor atendiam as características de seus corpos hídricos. Sua devida interpretação meticulosa não apenas orienta a gestão eficaz dos recursos, mas também subsidia decisões críticas para a sustentabilidade, promovendo a preservação dos ecossistemas aquáticos. Por conta disto, este trabalho optou por realizar os ensaios com o IQA-NSF e o IQA-CETESB com o intuito de universalizar os resultados (ROSSI et al., 2012; LAUREAU et al, 2017; ANA, 2020; CETESB, 2020).

Foi possível observar, a partir dos dados encontrados, que o índice pluviométrico acumulado nas 72 h antes das coletas não foi suficiente para influenciar os parâmetros de qualidade da água (Tabela 3), com exceção do mês de janeiro. Com o aumento da vazão nos períodos chuvosos (janeiro), parâmetros como coliformes totais e nitrogênio são diluídos, alterando os resultados de forma a indicar uma melhora nesses parâmetros quando comparados aos demais meses do ano. Porém, outros parâmetros são agravados, como turbidez e sólidos dissolvidos.

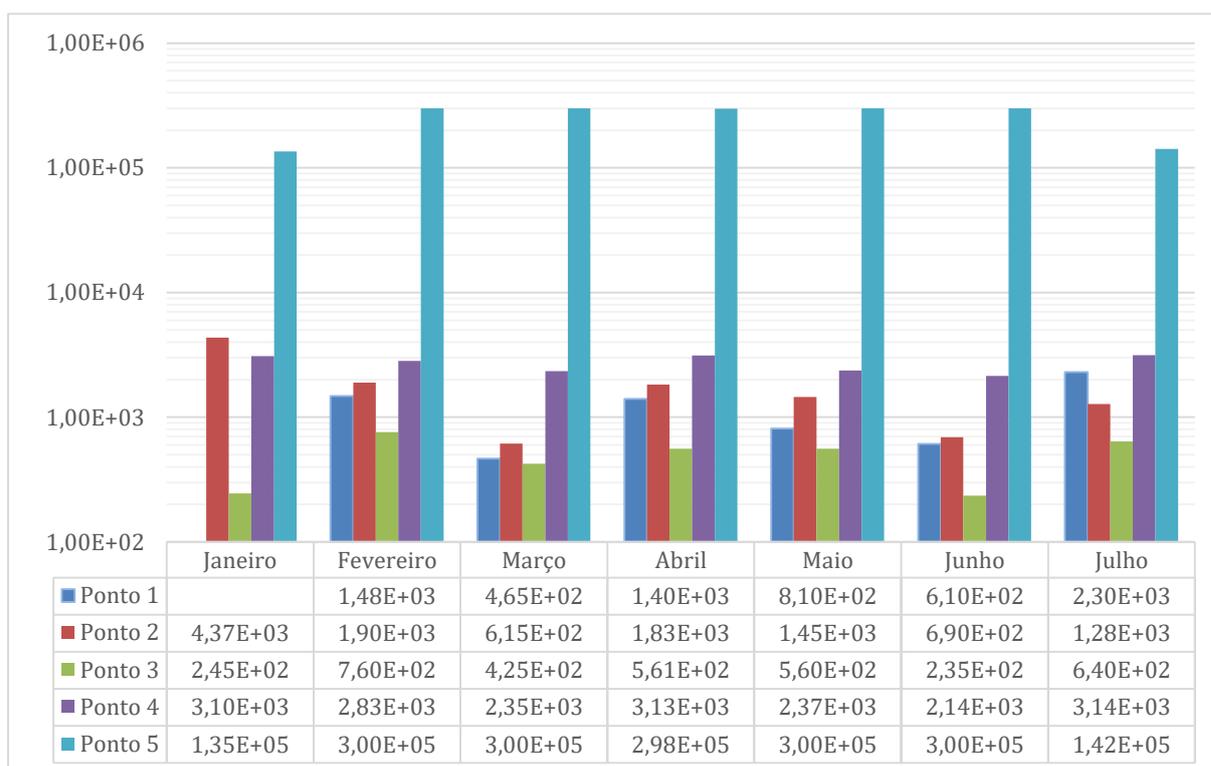
Tabela 3 - Índice pluviométrico da Bacia Hidrográfica do Rio Guandu nos meses avaliados

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Média
Ind. Pluv.	40 mm	7 mm	3 mm	0 mm	0 mm	2 mm	1 mm	7 mm

Fonte: O autor, 2023.

No que se refere ao parâmetro de *E. coli*, observou-se uma variação expressiva nos resultados entre os diferentes pontos de amostragem e nos meses ao longo do ano. O Ponto 5 (rio Queimados), em particular, apresentou valores extremamente elevados em alguns meses, atingindo 3,00E+05 UFC/100ml em quatro deles, o que é significativamente superior aos demais pontos (Figura 17). A média geral de coliformes totais foi alta, indicando uma presença constante desses microrganismos na água da BHRG. No mês de janeiro, como uma medida de segurança, optou-se por não realizar a coleta no ponto 1 (rio Guandu) por conta das fortes chuvas e impossibilidade de chegar ao local de coleta. Chuvas estas que interferiram nos resultados dos demais pontos, devido ao fator diluição.

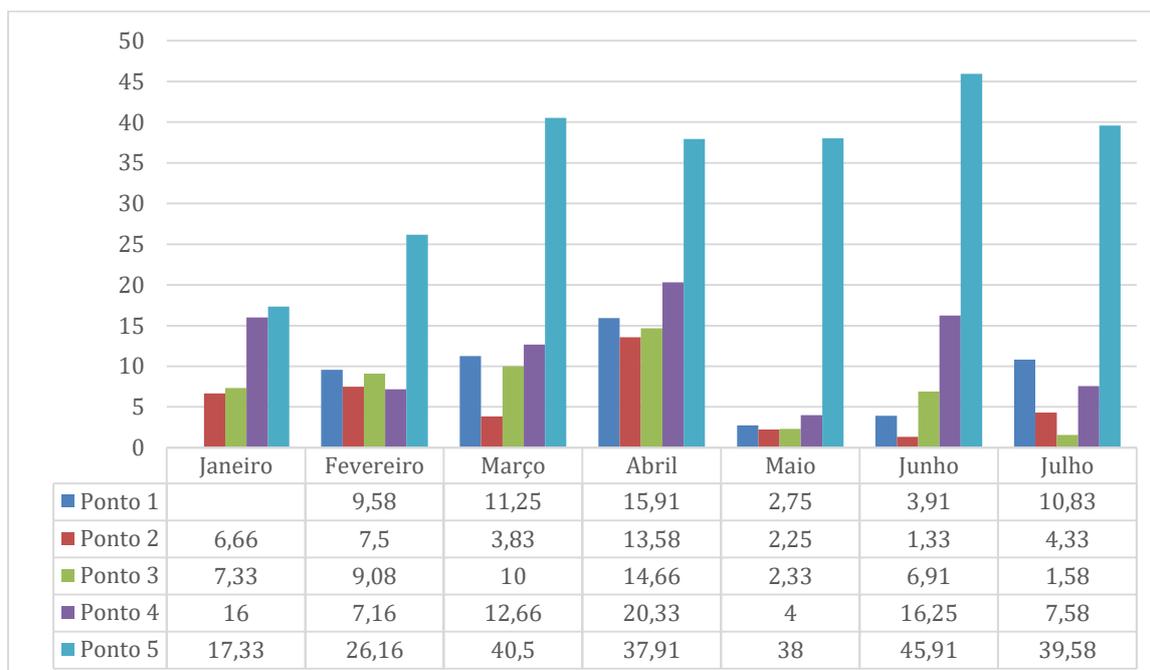
Figura 17 - Variação Mensal de *E. coli* (UFC/100ml) nos Pontos de Amostragem de água ao longo do curso do rio Guandu, rio dos Poços e rio Queimados.



Fonte: O autor, 2023. Obs: 3,00E+05 = valor máximo da leitura.

A DBO é um indicador crucial da qualidade da água, pois reflete a quantidade de oxigênio necessário para decompor a matéria orgânica presente. Valores elevados podem levar à redução do oxigênio dissolvido, prejudicando a vida aquática (ANA, 2020). Há uma variação considerável nos níveis de DBO entre os diferentes pontos de amostragem e ao longo dos meses. Novamente o ponto 5 destacou-se com os maiores valores, indicando um potencial fonte significativa de matéria orgânica ou carga poluente (Figura 18). Esses pontos com valores mais elevados, podem indicar a presença de fontes de contaminação, como descargas de esgoto ou atividades industriais, que contribuem significativamente para a carga orgânica nos corpos d'água (LAUREAU et al, 2017). A média na bacia hidrográfica do rio Guandu de DBO estava em torno de 13,82 mg/L O₂, o que sugere uma presença considerável de matéria orgânica nos corpos d'água avaliados (Figura 18). A Resolução CONAMA nº 357/2005 (BRASIL, 2005) estabelece valor limite para a classe 1 de até 3 mg/L, até 5 mg/L para a classe 2, até 10 mg/L para a classe 3, não é estabelecido valor limite para a classe 4. Essa média (13,82 mg/L) está acima dos limites desejáveis para corpos d'água, evidenciando uma condição alarmante para qualidade da água tornando-a inviável inclusive para captação para fins de abastecimento público.

Figura 18 - Variação Mensal de DBO (mg/l O₂) nos Pontos de Amostragem de água ao longo do curso do rio Guandu, rio dos Poços e rio Queimados.

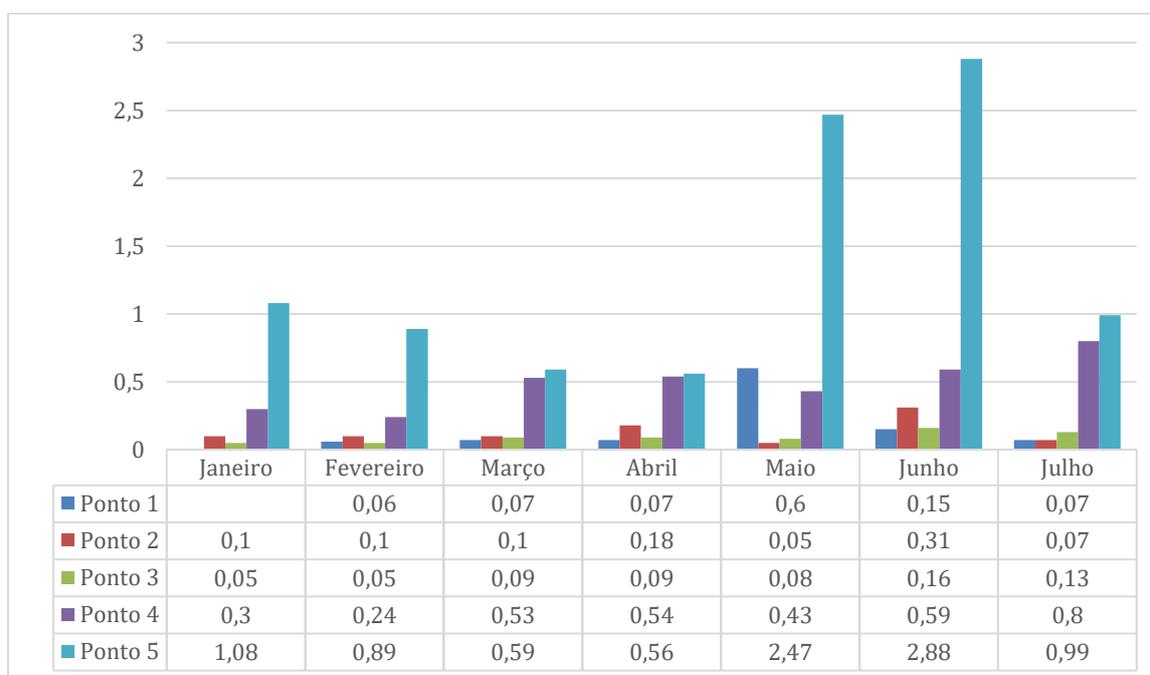


Fonte: O autor, 2023.

O fosfato é um nutriente que pode contribuir para a eutrofização de corpos d'água, estimulando o crescimento excessivo de algas. A presença de valores mais elevados, especialmente em locais com pouca movimentação de água, pode indicar um risco potencial para a qualidade da água (IAP, 2016).

Há uma variação significativa nos níveis de fosfato entre os diferentes pontos de amostragem e ao longo dos meses. O Ponto 5, novamente, destaca-se com os maiores valores, podendo indicar a presença de fontes de contaminação, como descargas de efluentes ricos em fosfato, e pode exigir investigação adicional. Uma análise mais detalhada ao longo dos meses pode revelar padrões sazonais e eventos pontuais que afetam os níveis de fosfato. Os picos nos meses de junho e julho merecem investigação adicional. A identificação de fontes específicas e a compreensão das condições que contribuem para os aumentos de fosfato são fundamentais para implementar ações de mitigação eficazes (LAUREAU et al, 2017). A média geral de fosfato foi de 0,44 mg/l, o que está dentro da faixa considerada normal, mas ainda merece atenção, pois valores elevados podem contribuir para problemas como eutrofização (Figura 19).

Figura 19 - Variação Mensal de Fosfato total (mg/l) nos Pontos de Amostragem de água ao longo do curso do rio Guandu, rio dos Poços e rio Queimados



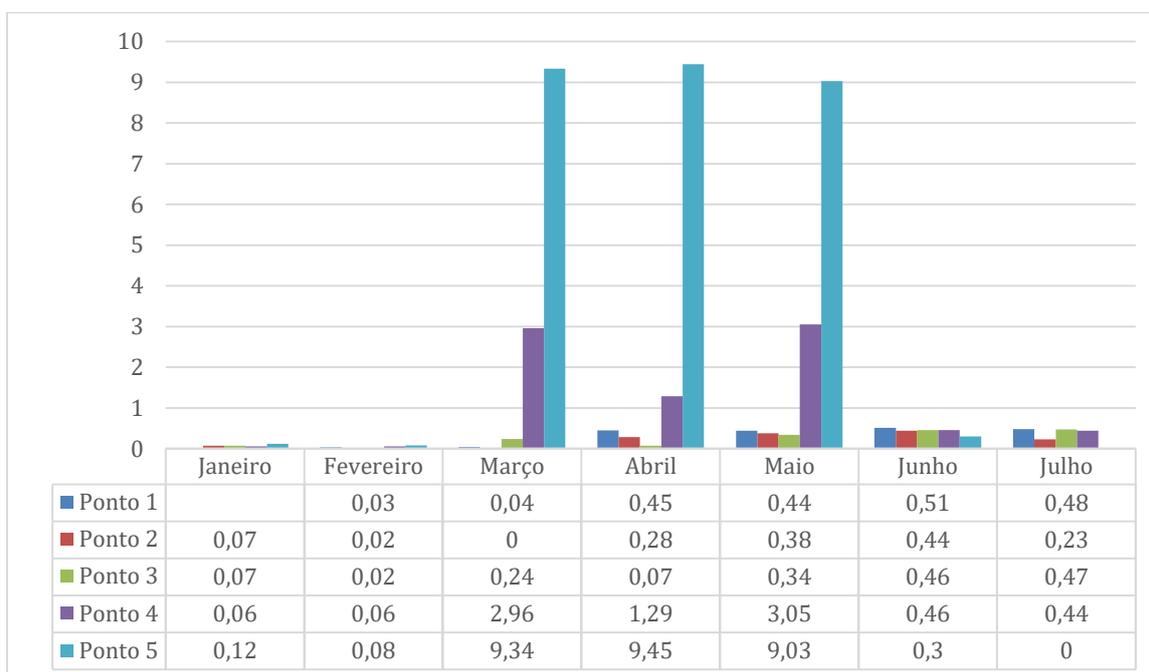
Fonte: O autor, 2023.

O nitrato (NO_3^-) é uma forma oxidada de nitrogênio presente em ambientes aquáticos. Sua presença na água pode ter origens naturais, como a decomposição de matéria orgânica, ou ser resultante de atividades humanas, como descargas industriais, agrícolas e domésticas ((NOGUERA-OVIEDO; AGA, 2016; LAUREAU et al, 2017). O nitrato é uma substância de importância ambiental, pois seu excesso na água pode levar a impactos negativos na qualidade hídrica, incluindo problemas de saúde e ecossistemas aquáticos.

A análise do índice pluviométrico é relevante para correlacionar os níveis de nitrato com eventos de precipitação. Destacaram-se os meses de janeiro e fevereiro por possuírem os maiores índices pluviométricos e, também, as menores concentrações, permitindo entender melhor os efeitos das chuvas na concentração de nitrato na água (Figura 20). A tabela apresenta variações significativas nos níveis de nitrato ao longo dos meses. Destacam-se os meses de março, abril e maio com valores mais elevados, indicando possíveis influências sazonais. (VON SPERLING, 2005)

O Ponto 5 demonstra valores de nitrato notavelmente mais altos em comparação com os outros pontos, sugerindo uma possível fonte significativa de contaminação nesse local, exigindo uma investigação mais aprofundada. Valores extremos, como 9,34 mg/l em março (Ponto 5) em comparação com a média geral de 1,20 mg/l, indicam eventos pontuais graves de contaminação. Esses eventos merecem atenção especial, pois podem ter impactos significativos, exigindo medidas punitivas, caso haja contaminação por efluentes industriais, além de medidas corretivas, demandando a implementação de estratégias eficazes de gestão da qualidade da água visando preservar e restaurar a qualidade ambiental.

Figura 20 - Variação Mensal de Nitrato (mg/l) nos Pontos de Amostragem de água ao longo do curso do rio Guandu, rio dos Poços e rio Queimados

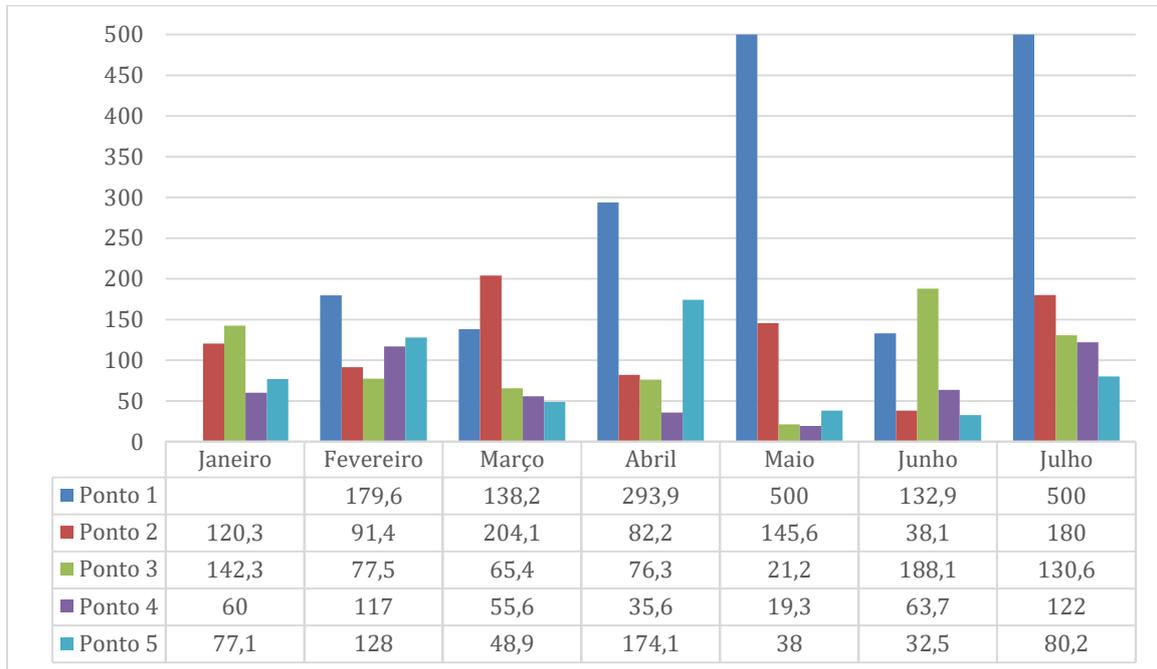


Fonte: O autor, 2023.

O Oxigênio dissolvido (OD) assume um papel de vital importância para os organismos aeróbios. Durante o processo de estabilização da matéria orgânica, as bactérias recorrem ao oxigênio em seus procedimentos respiratórios, potencialmente ocasionando uma diminuição de sua concentração no meio. Conforme a magnitude desse fenômeno, múltiplos organismos aquáticos, inclusive peixes, podem sucumbir. Na eventualidade do completo consumo do oxigênio, ocorre uma condição anaeróbia, acompanhada da emissão de odores desagradáveis (VARGAS, 2016; LAP et al, 2023). Este constitui o principal parâmetro para caracterizar os efeitos da poluição hídrica decorrente de despejos orgânicos, sendo uma variável ambiental clássica, cuja ausência pode impactar significativamente a biota aquática (VARGAS, 2016; LAP et al, 2023).

Neste parâmetro, a média total dos meses por ponto de amostragem analisado apresentou resultados acima do mínimo estabelecido na Resolução CONAMA 357 (BRASIL, 2005) que é de 6 mg/l O₂ (aproximadamente 72,62% de saturação), com exceção do ponto 4, que ficou abaixo do recomendado (67,6% de saturação ou 5,59 mg/l O₂), demonstrando um risco real para biota aquática local (Figura 21).

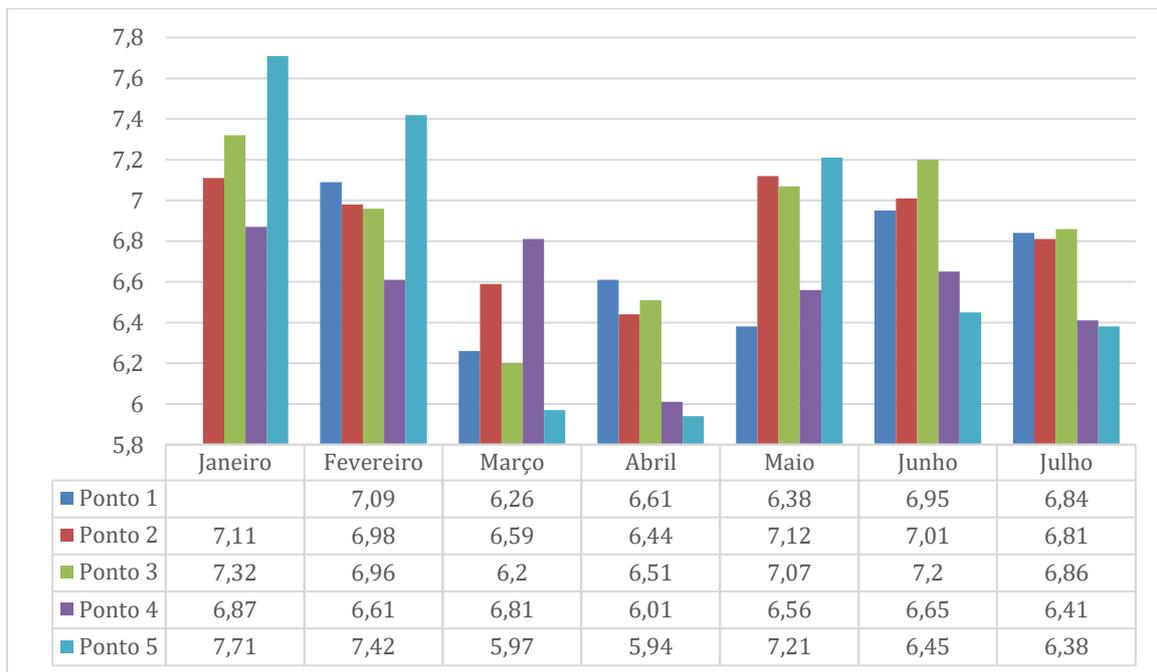
Figura 21 - Variação Mensal de Oxigênio Dissolvido (% de saturação) nos Pontos de Amostragem de água ao longo do curso do rio Guandu, rio dos Poços e rio Queimados



Fonte: O autor, 2023. Obs: 500 = valor máximo do instrumento de leitura

O pH constitui um parâmetro significativo que, aliado a outros, pode proporcionar indícios sobre o grau de poluição, o metabolismo de comunidades ou os impactos em um ecossistema aquático. As águas naturais exibem uma faixa de pH situada entre 4 e 9, sendo essa faixa influenciada pela dissolução de CO_2 , resultando em valores mais baixos de pH, e pelas reações de HCO_3^- e CO_3 com a água, que conduzem a valores mais elevados de pH. De maneira geral, quando o pH se aproxima de 9, verifica-se a remoção de gás no decorrer do processo de fotossíntese. Importa ressaltar que a espécie química preponderante dependerá do pH final do corpo d'água (o qual também é determinado pela presença de outros ácidos e bases), bem como das respectivas constantes de equilíbrio das reações (ROSSI et al., 2012; COMITÊ GUANDU, 2018; ANA, 2022). Neste ponto, como define o CONAMA 357, a faixa de pH aceita para um corpo hídrico natural é de 6 a 9 (BRASIL, 2005). Apesar de que em alguns pontos o resultado se aproxima do mínimo, as todas as análises realizadas nesta pesquisa sobre pH foram satisfatórias (Figura 22).

Figura 22 - Variação Mensal de pH nos Pontos de Amostragem de água ao longo do curso do rio Guandu, rio dos Poços e rio Queimados

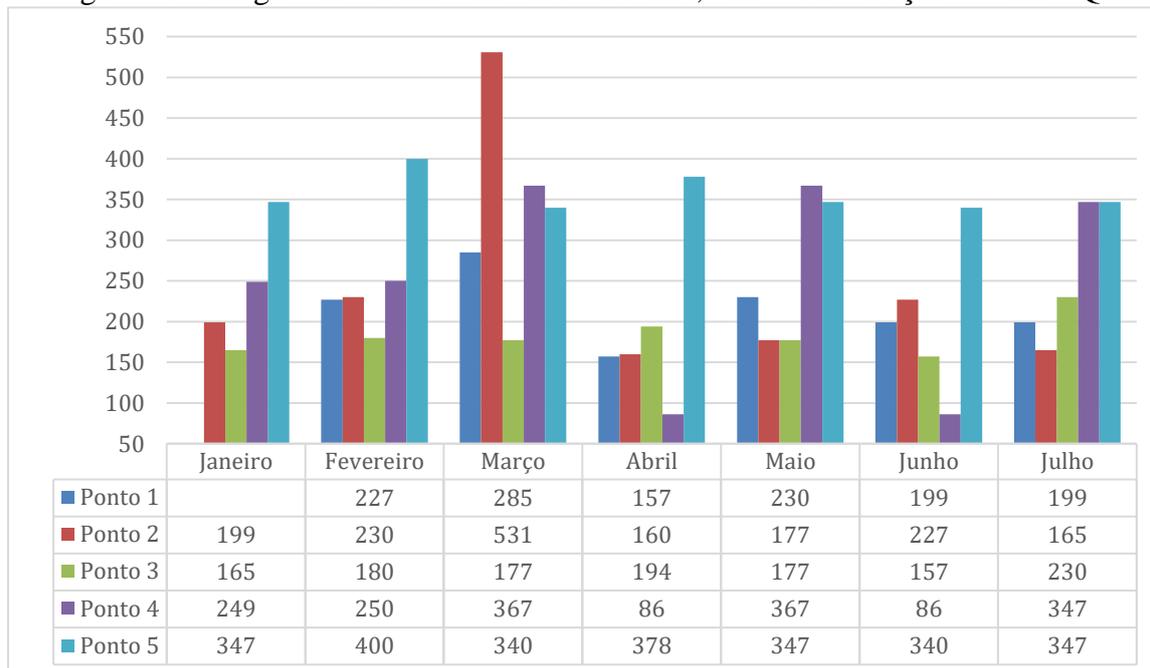


Fonte: O autor, 2023.

Para os recursos hídricos, a presença de sólidos representa uma ameaça potencial aos peixes e à vida aquática. Esses sólidos têm a capacidade de se depositar no leito dos rios, ocasionando a destruição de organismos fundamentais na cadeia alimentar, bem como podendo causar danos aos leitos de desova de peixes. Na forma de sólidos em suspensão, coloidais ou dissolvidos, orgânicos e inorgânicos, possuem a propriedade de reter bactérias e resíduos orgânicos nas profundezas dos rios, promovendo processos de decomposição anaeróbia. Todos os contaminantes presentes na água, com a exceção dos gases dissolvidos, contribuem para a carga de sólidos. Em virtude disso, a análise dos sólidos é realizada de forma independente, antecedendo a avaliação dos diversos parâmetros que compõem a qualidade da água (LAUREAU et al, 2017).

Assim como o pH, os resultados gerais encontrados nesta pesquisa encontram-se abaixo do valor máximo de 500mg/l permitido pelo CONAMA nº 357/2005, sendo o ponto 5 e, correspondente ao rio Queimados o que possui o maior valor em média, porém sem ultrapassar o valor máximo estabelecido (Figura 23) (BRASIL, 2005).

Figura 23 - Variação Mensal de Sólidos Totais Dissolvidos(mg/l) nos Pontos de Amostragem de água ao longo do curso do rio Guandu, rio dos Poços e rio Queimados



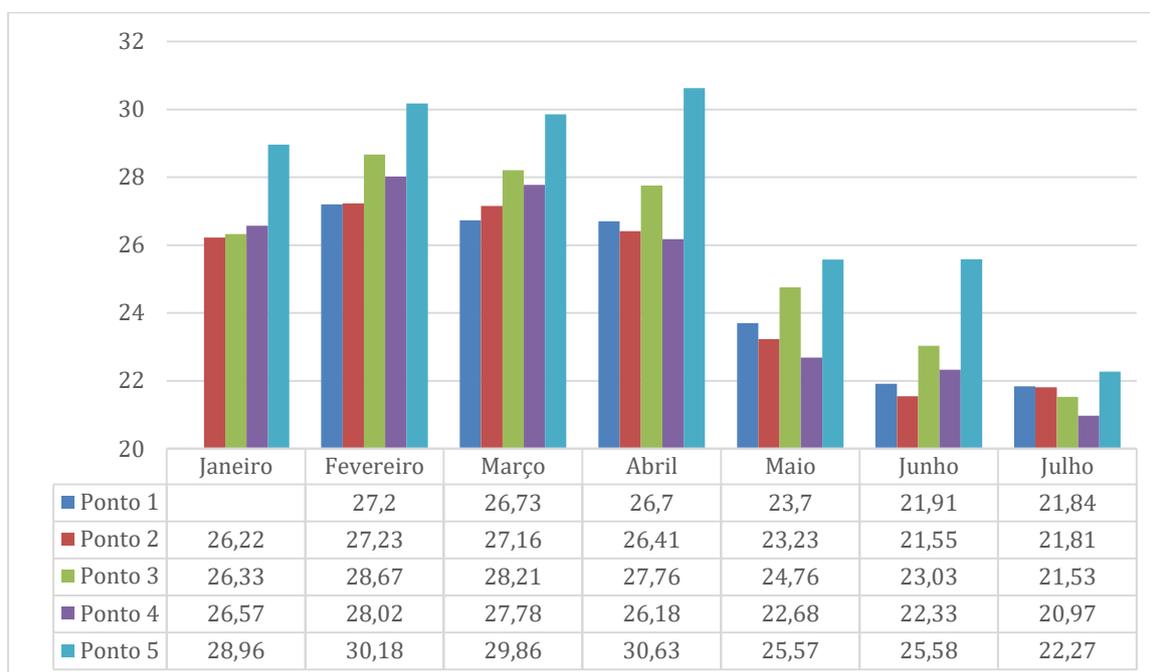
Fonte: O autor, 2023.

A temperatura exerce influência sobre diversos processos químicos, físicos e biológicos que se desenrolam em um sistema aquático, incluindo o metabolismo dos organismos e a degradação da matéria orgânica. Esse parâmetro, quando empregado na caracterização das águas, apresenta duas origens distintas: a primeira delas é origem natural e está associada à transferência de calor por radiação e condução entre a atmosfera e o solo. A segunda, é a origem antropogênica, por sua vez, está vinculada às águas provenientes de torres de resfriamento e despejos industriais (LAUREAU et al, 2017).

A relevância da temperatura como indicador de qualidade da água reside no fato de que o aumento da temperatura amplia as taxas de reações químicas e biológicas, reduz a solubilidade dos gases e intensifica a taxa de transferência destes últimos. Esse fenômeno pode resultar na emissão de odores desagradáveis, especialmente quando há liberação de gases de caráter malcheiroso (INCTAA, 2014, ANA 2022).

Todas as coletas de campo foram realizadas entre 10h e 13h, porém o clima em cada um dos dias de coleta era distinto. Contudo, não houve uma significativa diferença de temperatura da água entre os pontos em cada coleta (Figura 24).

Figura 24 - Variação Mensal de Temperatura (°C) nos Pontos de Amostragem de água ao longo do curso do rio Guandu, rio dos Poços e rio Queimados



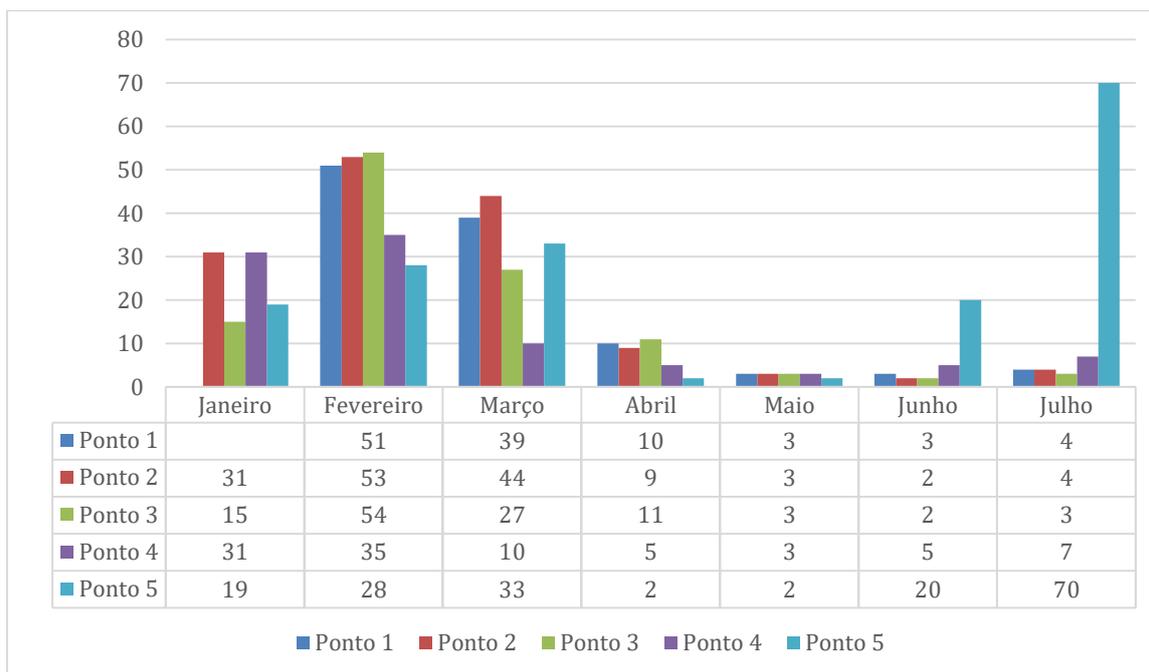
Fonte: O autor, 2023.

A turbidez denota o grau de interferência na passagem da luz através da água, conferindo-lhe uma aparência turva. A erosão das margens dos rios durante as estações chuvosas é um exemplo de fenômeno que resulta no aumento da turbidez das águas. Efluentes provenientes de esgotos sanitários também contribuem para elevações na turbidez das águas (ANA, 2020; LAP et al, 2023).

Do ponto de vista ambiental, a principal consequência da modificação da turbidez em um corpo d'água é a redução da penetração da luz solar, resultando na diminuição da taxa fotossintética e prejudicando a oxigenação do meio, especialmente em águas estagnadas ou em rios de baixa turbulência. A turbidez tem a tendência de aumentar com o crescimento da vazão, fato este que foi identificado nesta pesquisa.

Os maiores índices de turbidez foram encontrados nos meses chuvosos (janeiro e fevereiro e março), e os menores resultados nos meses de estiagem (abril, maio e junho). Apesar da variação mensal, dentre as 34 amostras coletadas, cinco ficaram acima de 40 NTU (os pontos 1, 2 e 3 em fevereiro, o ponto 2 em março e o ponto 5 em julho), valor máximo permitido pelo CONAMA nº 357 (Figura 25) (BRASIL, 2005).

Figura 25 - Variação Mensal de Turbidez (NTU) nos Pontos de Amostragem de água ao longo do curso do rio Guandu, rio dos Poços e rio Queimados



Fonte: O autor, 2023.

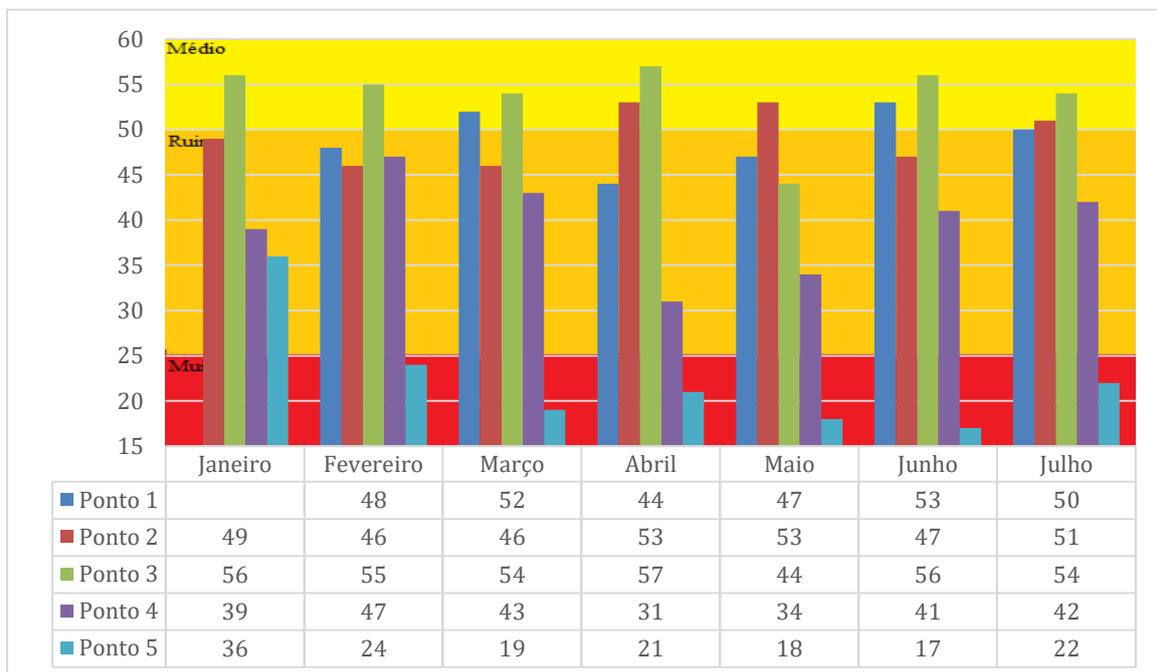
O objetivo do IQA é atingido quando ultrapassa a fronteira do conhecimento técnico e elucida as dúvidas do público leigo que usufrui dos recursos naturais de suas localidades. Apesar de grande parte da população ter acesso à água tratada, conhecer as características originais dos corpos hídricos é importante para ter ciência do nível de degradação e perda de qualidade local. (ROSSI et al., 2012; BRASIL, 2018; COMITÊ GUANDU, 2018; ANA, 2022).

O estado do Rio de Janeiro, assim como AL, MG, MT, PR, RN, RS, padronizaram a utilização do IQA-NSF, enquanto os estados de SP, BA, CE, ES, GO, MS, PB e PE utilizaram o IQA-CETESB. Apesar de serem faixas parecidas, os critérios de avaliação são diferentes, impedindo uma comparação direta entre os resultados. Com isso, foram compilados os resultados em ambas as faixas.

Os resultados mensais de IQA apresentaram variações, de 17 a 57 tanto no IQA-NSF (Figura 26) quanto no IQA-CETESB (Figura 27), sendo classificados como muito ruim a médio, e muito ruim a bom, respectivamente. Em ambos os gráficos de IQA foi utilizado ao fundo o padrão de cores recomendado pela ANA (2020) para um melhor entendimento dos resultados encontrados. Nos dois gráficos, o ponto 5 encontra-se muito degradado, variando de 17 a 36 no IQA-NSF e de 17 a 34 IQA-CETESB (sendo classificado com muito ruim e ruim em ambas as

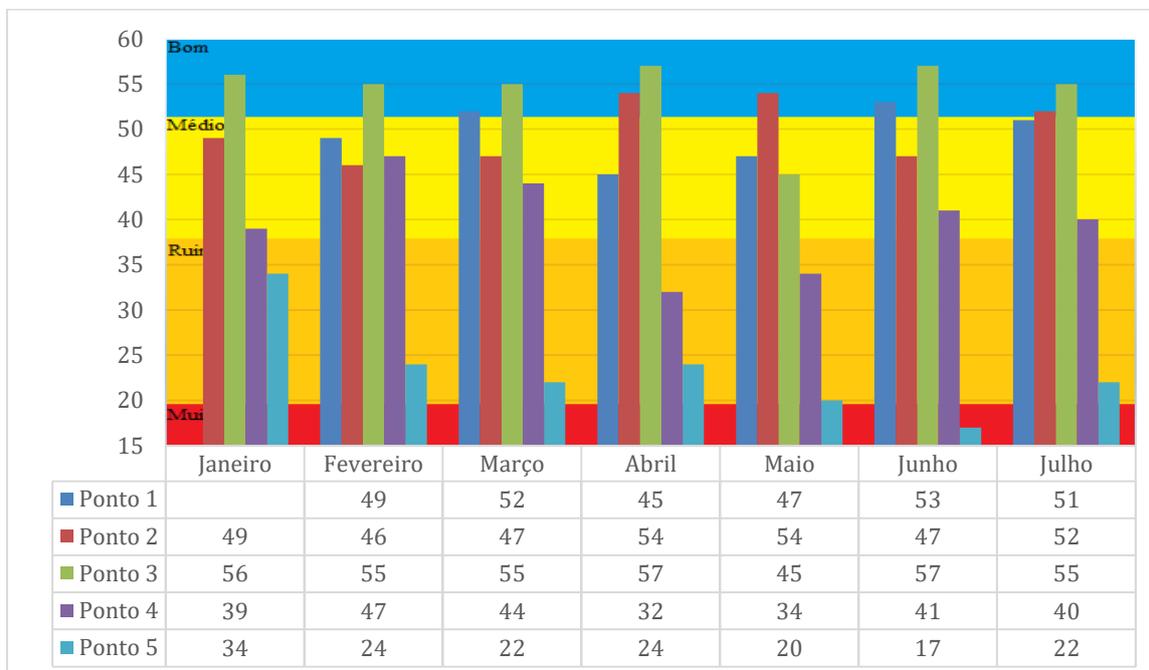
faixas), seguido pelo ponto 4 (46 a 53 e 46 a 54, respectivamente), ponto 1 (44 a 53 e 45 a 53, respectivamente), ponto 2 (46 a 53 e 45 a 54, respectivamente) e, por fim, o ponto 3 como sendo o mais bem avaliado variando de 44 a 57 no IQA-NSF e de 46 a 54 no IQA-CETESB. Tais resultados são condizentes com as características de cada corpo hídrico (rio Guandu, rio dos Poços e rio Queimados).

Figura 26 - Resultados de IQA-NSF por ponto de coleta de água ao longo do curso do rio Guandu, rio dos Poços e rio Queimados por mês e suas respectivas faixas



Fonte: O autor, 2023.

Figura 27 - Resultados de IQA-CETESB por ponto de coleta de água ao longo do curso do rio Guandu, rio dos Poços e rio Queimados por mês e suas respectivas faixas



Fonte: O autor, 2023.

Apesar do ponto 3, 6 dos 7 meses analisados exibirem resultados maiores que 55 (bom), ainda está longe de ser considerado um rio adequado para diversos usos pela população (sendo recomendado acima de 70). Ao focalizar exclusivamente esse ponto, seus pontos transitam do ruim para médio no IQA-NSF e de médio para bom no IQA-CETESB. Essa discrepância nas interpretações pode induzir uma falsa sensação de segurança no público leigo, acarretando potenciais prejuízos.

4.2. Resultados da ecotoxicidade e agrotóxicos

No tocante aos estudos de ecotoxicidade, optou-se pela utilização de organismos testes de dois níveis tróficos distintos: a *Raphidocelis subcapitata* (microalga unicelular) e a bactéria *Vibrio fischeri* (bactéria bioluminescente). Estes organismos são bioindicadores padronizados para análises ecotoxicológicas e utilizados em larga escala por pesquisadores da área. Essa escolha fundamentou-se na sua condição de bioindicadores padronizados, conferindo-lhes um status de confiabilidade e estabelecendo um respaldo sólido para os resultados obtidos (SILVA, 2015; ABNT, 2018). Cabe destacar que a presença desses organismos na área de

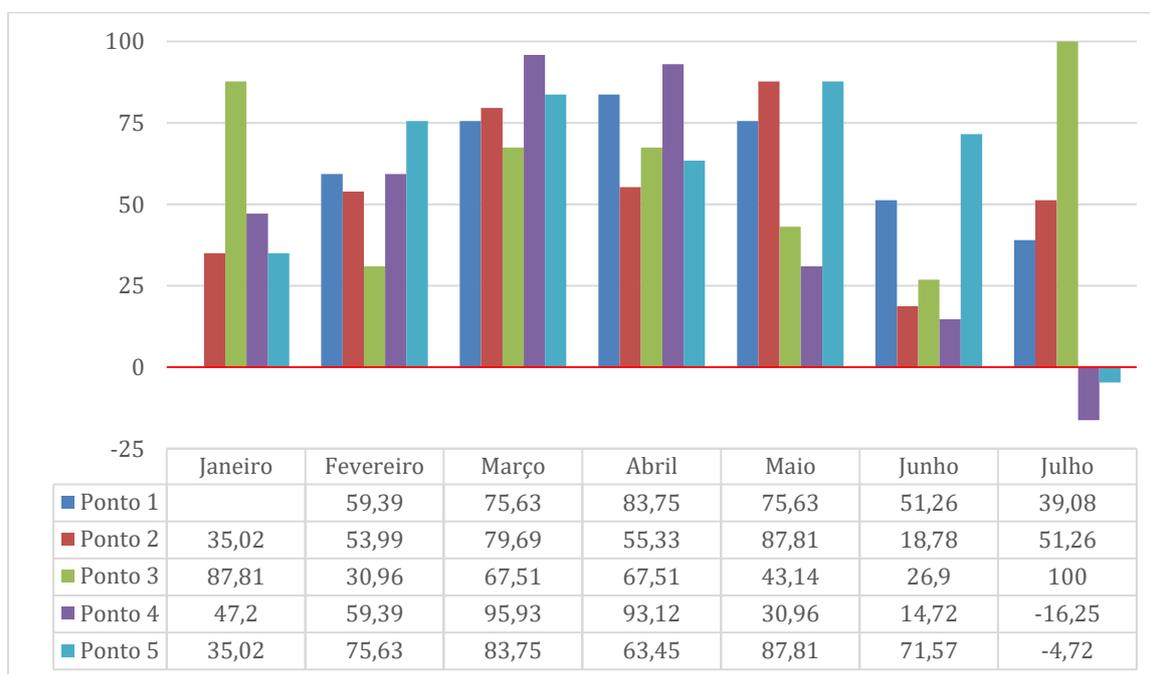
estudo adiciona uma camada de relevância, potencializando a capacidade de correlação com as características específicas do ambiente investigado.

O ensaio consiste em expor os organismos às amostras de água in natura em ambiente controlado e avaliar o crescimento ou declínio da biomassa (mg/L) após 72 h de exposição em comparação com uma amostra controle. Neste quesito, as médias mensais apresentaram uma redução de 33,87% a 80,50%, indicando uma mortalidade significativa das microalgas em alguns pontos analisados. Ponto 3 destaca-se com uma média relativamente alta (60,54%), indicando uma taxa de mortalidade expressiva nesse local. No ponto 4 foi observada uma média elevada de mortalidade (46,43%), com flutuações que podem indicar variações sazonais na qualidade da água, como observado para os parâmetros turbidez e sólidos totais dissolvidos, que pode ter levado a mortalidade dos organismos.

A média geral de 56,91% demonstra uma redução de biomassa que está acima do limite máximo permitido (50%) para amostras ambientais, como é preconizado pela norma ABNT-BR 12.648 (ABNT, 2018), evidenciando a necessidade de investigações mais constantes e aprofundadas para o melhor entendimento da constante mortalidade em níveis elevados.

No mês de julho, duas amostras, ponto 4 (Rio Poços) e ponto 5 (Rio Queimados), apresentaram resultados negativos de -16,25% e 4,72%, respectivamente, ou seja, um crescimento de algas maior que o controle. Este acontecimento é raro, mas pode indicar a presença de substâncias que auxiliam no crescimento natural dos organismos, como alta matéria orgânica ou fertilizantes agrícolas, por exemplo (ABNT, 2018). Por ambas terem ocorrido no mesmo mês, soa o alarme para futuras investigações caso venham a ocorrer (Figura 28).

Figura 28 - Variação Mensal do crescimento da Microalga *Raphidocelis subcapitata* (%) nos Pontos de Amostragem de água ao longo do curso do rio Guandu, rio dos Poços e rio Queimados



Fonte: O autor, 2023.

Ainda no âmbito dos estudos de ecotoxicidade, vale ressaltar que no ensaio de microtoxicidade, empregou-se a bactéria *Vibrio fischeri*, um bioindicador padronizado amplamente adotado por pesquisadores especializados, caracterizando-se pela confiabilidade e fidedignidade dos resultados que oferece (NOBREGA, SOUZA, MEDEIROS, 2019).

O ensaio consiste em expor a bactéria *Vibrio fischeri* à amostra ambiental em ambiente controlado por 30 minutos e registrar o efeito na redução da bioluminescência, e, por consequência, mortalidade da bactéria, que não deve ultrapassar 50%, como descrito na norma ABNT-BR 15.411-3/21 (ABNT, 2021). Neste parâmetro, a maior parte dos pontos apresentou resultados mensais satisfatórios. Ou seja, com baixa mortalidade das bactérias. O ponto 2 apresentou os maiores valores de mortalidade entre os cinco pontos e o mês de abril foi o mês com a maior mortalidade em todos os corpos hídricos, e, por consequência, apresentou os dois maiores resultados dentre todo o estudo: ponto 2 com 75,31%, e ponto 3 com 71,34% (Figura 29).

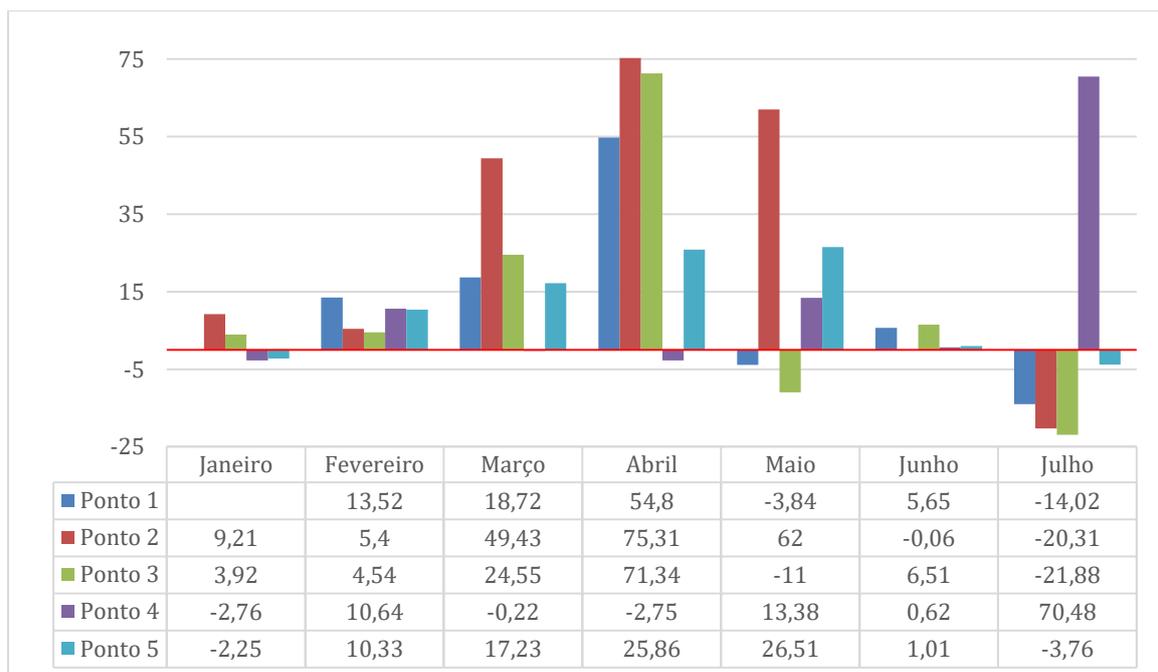
Tais resultados da bactéria *Vibrio fischeri* indicaram fortemente uma contaminação local no mês de abril que deve ser investigada para que possamos entender melhor os fatores que contribuem para essas flutuações nos pontos específicos, e o monitoramento contínuo é

essencial para identificar tendências a longo prazo e eventos específicos que podem afetar a qualidade da água.

Das amostras analisadas, 32,35% resultaram em valores negativos, ou seja, houve uma produção de luz maior que a dos organismos controle. Como descrito na bibliografia ABNT (2021), o aumento na produção de luz não necessariamente demonstra uma melhora nos resultados e sim que o organismo entrou em contato com algum conjunto ou substância que gerou um estresse elevado.

Analisando os dois organismos indicadores, a bactéria *Vibrio fischeri* assim como nos ensaios com a microalga *Raphidocelis subcapitata* (Figura 29), o mês de julho foi o que apresentou os resultados mais preocupantes: As bactérias passaram por estresse em quatro dos cinco pontos, sendo essa uma informação importante para ser analisada em busca de possíveis causas. Em resumo, enquanto a média geral indica uma qualidade aceitável da água, baseado em parâmetros físico-químicos, é crucial correlacionar essas informações com lançamento de resíduos sólidos e efluentes que lançam sobre os corpos hídricos poluentes não analisados nesse trabalho, e que podem afetar a saúde os organismos de forma a identificar potenciais áreas de preocupação e implementar ações corretivas/punitivas, quando necessário.

Figura 29 - Variação Mensal de produção de luz da bactéria *Vibrio fischeri* (%) nos Pontos de Amostragem de água ao longo do curso do rio Guandu, rio dos Poços e rio Queimados



Fonte: O autor, 2023.

Por fim, em fevereiro foi realizado um ensaio para a detecção de seis agrotóxicos, sendo Acetamiprido, Atrazina, Imidacloprido, Tiametoxam, Tiacloprido e Diuron. Os cinco primeiros não foram encontrados nas amostras coletadas ao longo do Rio Guandu, mas o Diuron foi encontrado. O Diuron é um herbicida sistêmico, indicado para as culturas de algodão, café, cana-de-açúcar e citrus e ultrapassou em muito o limite máximo permitido pela Portaria de Potabilidade de água (VMP) do ensaio (Tabela 4).

Tabela 4 - Concentrações de agrotóxicos encontrados nas amostras de água ao longo do curso do rio Guandu, rio dos Poços e rio Queimados

Resultados dos agrotóxicos encontrados em água no mês de fevereiro						
Amostra	Agrotóxicos					
	Acetamiprido	Atrazina	Diuron - LD (µg/L)	Imidacloprido	Tiacloprido	Tiametoxam
Ponto 1	<LD	<LD	5,4	<LD	<LD	<LD
Ponto 2	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Ponto 3	<LD	<LD	4,1	<LD	<LD	<LD
Ponto 4	<LD	<LD	4,7	<LD	<LD	<LD
Ponto 5	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD

Fonte: O autor, 2023.

Apesar do baixo valor encontrado, haja vista que a Portaria de Consolidação nº 888 de 2021 estipula que o valor máximo permitido (VMP) para o Diuron é de 20 (µg/L) para água pós-tratamento, a mera detecção deste composto acende um preocupante alerta. Não apenas pelo Diuron em si, mas por todos os compostos que podem estar neste momento sendo carregados e impactando sobremaneira a fauna e flora local da BHRG, além da saúde da população que usufrui desta água, uma vez que não foi estabelecido até o momento nas ETA um processo para a retirada desses agrotóxicos.

Por conta de limitações de logística, não foi possível realizar as análises em todos os sete meses de estudo, abrindo uma possibilidade para novos estudos futuros que busquem não só os seis agrotóxicos analisados, mas todos os 40 que constam no anexo XX do padrão de potabilidade (BRASIL, 2021).

4.3. Implicações e impactos

Os resultados apresentados revelam variações substanciais ao longo de diferentes períodos e entre os pontos de coleta, sugerindo uma heterogeneidade na qualidade da água na bacia. Tais disparidades são atribuídas a diversas fontes de contaminação, uma vez que não há ETE e nem tratamento de efluentes sanitários em alguns municípios da BHRG (COMITÊ GUANDU, 2017). A detecção acentuada não só de coliformes totais provenientes de efluente sanitário, mas de compostos químicos provenientes dos polos industriais presentes na BHRG, Sobretudos próximos aos pontos 4 e 5, que apresentam o menor índice de atendimento de saneamento no Estado, e um dos grandes póls industriais do Estado, suscita preocupações significativas de contaminação, demandando uma investigação aprofundada para identificação, correção e eliminação das fontes responsáveis

Valores elevados de DBO indicam a presença substancial de matéria orgânica, enquanto concentrações elevadas de fosfato e nitrato podem contribuir para processos de eutrofização. Nesse contexto, torna-se imperativo realizar investigações minuciosas para identificar as origens desses poluentes e implementar medidas corretivas apropriadas.

Apesar de a média geral do OD situar-se acima do limite mínimo estabelecido, o Ponto 4 apresenta resultados aquém do recomendado, sinalizando um risco concreto para a biota aquática local. A flutuação anual da turbidez sugere uma influência sazonal; no entanto, alguns meses registram valores acima dos padrões permitidos, o que pode impactar negativamente a fotossíntese e a oxigenação, demandando intervenções corretivas, como análises para recuperação das matas ciliares, vastamente degradadas na área de estudo. As análises de ecotoxicidade revelam taxas elevadas de mortalidade de microalgas e variações nos resultados do ensaio de microtoxicologia.

É de suma importância investigar as causas subjacentes e implementar medidas para atenuar a contaminação. Os dados apresentados neste documento possuem implicações de grande relevância nos serviços ecossistêmicos e sociais vinculados à bacia hidrográfica do rio Guandu, abrangendo diversas esferas, destacando-se:

- Serviços de abastecimento de água: altas taxas de contaminação podem comprometer a potabilidade da água, impactando sobremaneira a população da RMRJ, que não possui uma segunda opção para o abastecimento de água segura.

- Biodiversidade aquática: as condições adversas presentes na BHRG impactam na biodiversidade aquática. A diminuição na produção de luz e biomassa de algas evidencia impactos diretos na cadeia alimentar aquática, afetando organismos e ecossistemas associados.
- Saúde pública: a presença de coliformes totais em níveis elevados representa um risco direto à saúde pública, sinalizando possíveis contaminações fecais na água. Isso pode acarretar problemas de saúde para comunidades que dependem dessas águas para consumo.
- Produção primária aquática: a variação na fotossíntese, evidenciada pela redução na produção de luz e biomassa de algas, aponta impactos na produção primária aquática, afetando a base da cadeia alimentar e, conseqüentemente, a pesca e outras atividades dependentes da produção de organismos aquáticos em um efeito cascata.
- Recursos hídricos: a presença de substâncias como fosfato e nitrato, contribuindo para a eutrofização, pode resultar em desequilíbrios nos ecossistemas aquáticos. A turbidez, associada à erosão durante as chuvas em regiões sem mata ciliar, também afeta a qualidade dos recursos hídricos.
- Recreação, lazer e turismo: a contaminação da água e a presença de substâncias prejudiciais podem limitar as atividades, impactando negativamente as comunidades locais que utilizam os corpos d'água para essas finalidades.
- Agricultura e uso do solo: a presença de nitrato na água, especialmente em altas concentrações, pode indicar contaminação proveniente de fontes agrícolas, afetando a qualidade do solo e a sustentabilidade das práticas agrícolas na região.
- Educação ambiental e conscientização comunitária: a necessidade de campanhas de educação ambiental se destaca como medida crucial para conscientizar a comunidade sobre práticas sustentáveis, uso responsável da água e descarte adequado de resíduos.

Estes levantamentos têm implicações abrangentes e impactam vários Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), demonstrando a interconexão dos desafios ambientais com metas mais amplas de desenvolvimento. Pode-se destacar os ODS que são particularmente relevantes para as questões abordadas:

- ODS 3 - Saúde e Bem-Estar:

Meta 3.9: "Até 2030, reduzir substancialmente o número de mortes e doenças causadas por produtos químicos perigosos, poluição do ar, água e solo e contaminação do ambiente."

- ODS 6 - Água Limpa e Saneamento:

Submeta 6.1: "Até 2030, alcançar o acesso universal e equitativo à água potável e segura para todos."

Submeta 6.3: "Até 2030, melhorar a qualidade da água, reduzindo a poluição, eliminando despejo e minimizando a liberação de produtos químicos e materiais perigosos."

- ODS 11 - Cidades e Comunidades Sustentáveis:

Meta 11.6: "Até 2030, reduzir o impacto ambiental negativo per capita das cidades, inclusive prestando especial atenção à qualidade do ar e gestão de resíduos municipais e outros."

- ODS 12 - Consumo e Produção Responsáveis:

Meta 12.4: "Até 2020, alcançar a gestão ambientalmente saudável dos produtos químicos e de todos os resíduos ao longo de seus ciclos de vida, de acordo com os marcos internacionalmente acordados, e reduzir significativamente a liberação de produtos químicos e resíduos tóxicos para o ar, água e solo, a fim de minimizar seus impactos adversos sobre a saúde humana e o meio ambiente."

- ODS 13 - Ação Contra a Mudança Global do Clima:

Meta 13.3: "Melhorar a educação, sensibilização e capacidades humanas e institucionais sobre mitigação da mudança do clima, adaptação, redução de impacto e alerta precoce."

- ODS 14 - Vida na Água:

Meta 14.1: "Até 2025, prevenir e reduzir significativamente a poluição marinha de todos os tipos, particularmente oriunda de atividades terrestres, incluindo detritos marinhos e poluição por nutrientes."

- ODS 15 - Vida Terrestre:

Meta 15.1: "Até 2020, assegurar a conservação, recuperação e uso sustentável de ecossistemas terrestres e de água doce interiores e seus serviços, em particular florestas, zonas úmidas, montanhas e terras áridas."

Em síntese, as análises apontaram para uma condição preocupante na qualidade da água da bacia hidrográfica do rio Guandu, demandando a implementação urgente de medidas corretivas e estratégias de gestão para preservar os serviços ecossistêmicos e atender às demandas sociais associadas a essa relevante região. Deste modo, algumas estratégias e ações específicas podem ser consideradas:

1. Identificação e eliminação de fontes de contaminação:

- Conduzir investigações detalhadas para identificar as fontes específicas de contaminação, especialmente nos pontos críticos, como o Ponto 5 (rio Queimados).
- Implementar ações corretivas imediatas para eliminar ou reduzir as fontes identificadas, como controle de lançamentos industriais, tratamento de efluentes e fiscalização ambiental rigorosa.

2. Controle da eutrofização:

- Desenvolver e aplicar práticas agrícolas sustentáveis, visando reduzir o escoamento de nutrientes na água, principalmente fosfato e nitrato.
- Introduzir barreiras vegetativas e zonas tampão ao redor dos corpos d'água para minimizar a entrada de nutrientes e sedimentos.

3. Recuperação de matas ciliares:

- Realizar análises específicas para avaliar a necessidade viabilidade de recuperação das matas ciliares notadamente degradadas, com ações focadas na replantação de vegetação nativa.
- Promover programas de reflorestamento e educação ambiental para incentivar a preservação e restauração das áreas ripárias.

4. Tratamento de efluentes:

- Reforçar e fiscalizar a conformidade das instalações industriais e sistemas de tratamento de esgoto para garantir a eficiência na remoção de poluentes antes do descarte na bacia hidrográfica.

5. Monitoramento contínuo:

- Estabelecer programas de monitoramento contínuo da qualidade da água, com análises regulares e relatórios públicos para garantir a transparência e a conscientização.
- Utilizar tecnologias avançadas, como sensores remotos e análises de big data, para detectar variações e padrões ao longo do tempo.

6. Envolvimento comunitário e educação ambiental:

- Desenvolver campanhas de educação ambiental direcionadas à comunidade local, destacando a importância da conservação da água e práticas sustentáveis.
- Incentivar a participação ativa da comunidade em programas de monitoramento e preservação, promovendo uma abordagem coletiva na gestão dos recursos hídricos.

7. Revisão de normativas e regulamentações:

- Avaliar e fortalecer as normativas ambientais, estabelecendo limites mais rigorosos para emissões e descartes industriais, além de promover a conformidade e responsabilidade ambiental.

A implementação efetiva dessas estratégias, aliada à colaboração entre os setores público, privado e a comunidade local, é crucial para reverter a condição preocupante da qualidade da água na bacia hidrográfica do rio Guandu e preservar os serviços ecossistêmicos essenciais.

Os resultados apresentados neste estudo revelam uma complexa rede de desafios ambientais na bacia hidrográfica do rio Guandu, exigindo uma resposta multifacetada e estratégias eficazes para mitigar os impactos adversos. A presença significativa de coliformes totais, especialmente no Ponto 5, não só suscita preocupações imediatas de contaminação, mas também destaca a urgência de uma investigação detalhada para identificar as fontes específicas e implementar ações corretivas. Ações que precisam ser tomadas com urgência e de rapidamente, haja vista que a RMRJ corre sério risco de ficar sem água em quantidade e qualidade para abastecer sua população.

A alta concentração de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), fosfato e nitrato sinaliza a presença substancial de matéria orgânica e nutrientes na água, alimentando preocupações sobre a eutrofização. Estratégias para controlar a eutrofização, como práticas agrícolas sustentáveis e a introdução de barreiras vegetativas, tornam-se imperativas para preservar o equilíbrio dos ecossistemas aquáticos.

A relação entre os resultados e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) destaca a interconexão entre a qualidade da água e metas mais amplas de desenvolvimento. As implicações abrangentes nas áreas de saúde e bem-estar, água limpa e saneamento, cidades sustentáveis, consumo responsável, ação contra a mudança global do clima, vida na água e vida terrestre destacam a necessidade de uma abordagem integrada para enfrentar esses desafios.

As ações propostas, como a recuperação de matas ciliares e o tratamento de efluentes, refletem a importância de medidas preventivas e corretivas. O monitoramento contínuo, apoiado por tecnologias avançadas, é fundamental para avaliar a eficácia das intervenções ao longo do tempo. O envolvimento comunitário e programas de educação ambiental são essenciais para criar consciência e garantir a participação ativa na gestão sustentável dos recursos hídricos.

Tão importante quanto, é a continuação das análises e pesquisas nesse âmbito, visto a importância da água para qualquer forma de vida. Sendo assim, a caracterização da qualidade da água da Bacia Hidrográfica do Rio Guandu, objetivo deste estudo, dá início a uma análise sazonal e mais aprofundada que será realizada na próxima etapa, na pesquisa de doutorado sobre estudos ecotoxicológicos e, possivelmente, a análise da presença de agrotóxicos em tais recursos hídricos e suas implicações sociais, econômicas e ambientais.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com este estudo foi possível evidenciar a preocupante degradação ambiental ao longo da Bacia Hidrográfica do Rio Guandu, em especial no rio dos Poços e rio Queimados (ponto 4 e 5, respectivamente), e a deterioração na qualidade de sua água, exigindo ações imediatas para a recuperação dos serviços ecossistêmicos, uma vez que a ausência completa de saneamento básico é o problema central que deve ser solucionado, o quanto antes, para que possamos atender às necessidades socio-industriais associadas à região, como o abastecimento de água.

Nessas condições, a região metropolitana do Rio de Janeiro se vê em um grave dilema: Não há outro corpo hídrico com capacidade hídrica suficiente para suprir a população e o Rio Guandu com sua contínua degradação da qualidade da água e da bacia, atrelada a inação de prevenção das autoridades responsáveis, impossibilitará em um futuro próximo o tratamento seguro e adequado, podendo acarretar na interrupção do abastecimento público de água potável.

A detecção de agrotóxicos como o Diuron, mesmo que abaixo dos limites permitidos, aliado com a presença de altas concentrações de substâncias como *E. coli*, fosfato, nitratos e DBO indicam diversas fontes de contaminação, exigindo uma investigação mais abrangente, detalhada e firme, para que as medidas corretivas sejam efetivamente propostas.

As estratégias propostas, como identificação e eliminação de fontes de contaminação, controle da eutrofização, recuperação de matas ciliares, tratamento de efluentes, monitoramento contínuo e, envolvimento comunitário, oferecem um dos caminhos para reverter a condição preocupante da qualidade da água.

Os dados afastam a bacia hidrográfica do rio Guandu do cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), uma vez que, no nível atual de degradação, descumprem diferentes metas e devem ser enfrentadas para que sejam realizadas até 2030.

Este trabalho trouxe luz à preocupante situação que se encontra a Bacia Hidrográfica do rio Guandu, e inova ao interconectar a detecção dos impactos, com IQA e ecotoxicidade, suas implicações com os serviços ecossistêmicos e ODS e a elaboração de estratégias de mitigação e recuperação ambiental visando o pleno funcionamento do ecossistema.

Ademais, a colaboração entre setores público, privado e a comunidade com a realização de novos estudos colaborativos que visem, principalmente, a detecção de outros parâmetros, como contaminantes emergentes, fármacos, agrotóxicos, microplásticos, é crucial para o sucesso das medidas propostas e para garantir um futuro sustentável para as presentes e novas gerações que vivem na bacia hidrográfica do rio Guandu.

REFERENCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 13373: ecotoxicologia aquática – toxicidade aguda – Água de cultivo e de diluição com Daphnia spp (Crustácea, Cladocera)*. Rio de Janeiro, 2017

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 13373: ecotoxicologia aquática – toxicidade crônica – método de ensaio com Ceriodaphnia spp (Crustacea, Cladocera)*. Rio de Janeiro, 2017.

ANA (Agência Nacional de Águas). *Indicadores de qualidade: índice de qualidade de águas (IQA)*. 2020.

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. *ATLAS Esgotos: Despoluição de Bacias Hidrográficas*. 2023.

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. *ODS 6 no Brasil: Visão da ANA sobre os Indicadores*. 2022.

APHA - American Public Health Association; American Water Work Association – AWWA; Water Pollution Control Federation – WPCF. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 22^a ed. New York, 2012. p.1268

Association Française de Normalisation. AFNOR, *Norme experimental T90-304:1980. Essais dêseause. Determination de l'inhibition de Scenedesmus subspicatus par une substance*. 1980.

BAXTER, L.; BRAIN, R.A; LISSEMORE, L.; SOLOMON, K.R.; HANSON, M.L.; POSSER, R.S. Influence of light, nutrients, and temperature on the toxicity of atrazine to the algal species *Raphidocelis subcaptata*: Implications for the risk assessment of herbicides. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 132(2016):250-259.

BRANCO, S. M. *Hidrologia aplicada a engenharia sanitária*. 3^a ed. São Paulo: CETESB, 1986. p. 789.

BRASIL. Governo Federal. *Blog do Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente*. Brasília, DF, 2022.

CALMON, M. Restauração de Florestas e Paisagens em larga escala: O Brasil na liderança global. *Ciência e Cultura*. Vol.73 n.1 São Paulo, 2021.

CETESB, (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo) *Qualidade das águas. Interiores do estado de São Paulo – Apêndice D – Índices de qualidade de águas*. São Paulo, 2020.

CETESB, Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo -. *Índice de Qualidade da água (IQA)*. 2015.

CETESB. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo. *Relatório de Qualidade das Águas Superficiais | Apêndice D -Significado Ambiental e Sanitário das Variáveis de Qualidade*. 2009.

CHAIBLICH, J. V. et al. Estudo espacial de riscos à leptospirose no município do Rio de Janeiro (RJ). *Saúde Debate, Rio de Janeiro*, v. 41, n. especial, 2017, p. 225-240.

CHU, S.P. The influence of the mineral composition of the medium on the growth of planktonic algae. *Journal of Ecology*, 30:284-325. 1942.

COMITÊ DO GUANDU - *Relatório Executivo do Plano Estratégico de Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas do rio Guandu, da Guarda e Guandu Mirim*, 2018, p. 25.

CRISTOFARO, C.S.; BRANCO, C.W.; ROCHA, M.I.; PORTUGAL, S.G. Assessing glyphosate concentrations in six reservoirs of Paraíba do Sul and Guandu River Basins in southeast Brazil. *Revista Ambiente & Água*. Vol. 16, 2021.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN 38412-33:1991. Determining the tolerance of green algae to toxicity of waste water. (*Scenedesmus chlorophyll fluorescence test*) by way of dilution series (L33). 1991.

DIAS, A. C.; GOMES, F. W.; BILA, D. M.; SANT'ANNA, G. L.; DEZOTTI, M. Analysis of estrogenic activity in environmental waters in Rio de Janeiro state (Brazil) using the yeast estrogen screen. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 120, 2015, p. 41-47.

DUSABE, M. C., WRONSKI, T., GOMES-SILVA, G., PLATH, M., ALBRECHT, C., & APIO, A. Biological water quality assessment in the degraded Mutara rangelands, northeastern Rwanda. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(3), 131.

ESCOBAR, E., & CARVALHO-SANTOS, C. Impacts of future climate on water ecosystem services in the watershed of Homem river (northwest Portugal)]. *Finisterra – Revista Portuguesa de Geografia*, LVII(120), 125-148. 2022.

FERNANDES, J. G. Ocorrência de poluentes emergentes nos Rios Pirai, Paraíba do Sul, Guandu e na água de abastecimento da Região Metropolitana do Rio de Janeiro. *Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo*, 2018.

FERRAZ, R. P. D.; PRADO, R. B.; PARRON, L. M.; CAMAPANHA, M. M. Marco Referencial em Serviços Ecosistêmicos. *Embrapa Solos*, Brasília, 2019, p. 28- 113.

FINNEY, D.J. Statistical methods in biological assay. *Griffin Wycombe*, U.K. 1978.

FUGÈRE, V., KASANGAKI, A., & CHAPMAN, L. J. Land use changes in an afro-tropical biodiversity hotspot affect stream alpha and beta diversity. *Ecosphere*, 7(6), e01355. 2016.

GONÇALVES, E. S. Ocorrência e distribuição de fármacos, cafeína e bisfenol-a em alguns corpos hídricos no estado do Rio de Janeiro. *Tese (Doutorado em Geoquímica Ambiental) - Universidade Federal Fluminense. Rio de Janeiro*, 2012.

HAMILTON, M.A.; RUSSO, R.C.; THURSTON, R.V. Trimmed Spearman-Kärber method for estimating median lethal concentrations in toxicity bioassays. *Environmental Science Technology*, 1977. Correction, 12, no 4, p. 417, 1978.

Hindak, F. Studies on Chlorococcales algae (Chlorophyceae). V. *Biologické Práce* 36:1-227. 1990.

ISO. International Organization for Standardization. *Water quality – Guidelines for algal growth inhibition tests with poorly soluble materials, volatile compounds, metals and waste water*. 1ed. 14 p. 1999.

ISO. International Organization for Standardization. *Water quality Sampling: Part 16: guidance on biotesting of samples*. 1ed. 32 p. 1998.

LAFAGE, D., BERGMAN, E., ECKSTEIN, R. L., ÖSTERLING, E. M., SADLER, J. P., & PICCOLO, J. J. Local and landscape drivers of aquatic-to-terrestrial subsidies in riparian ecosystems: a worldwide meta-analysis. *Ecosphere*, 2019.

LAP, B. Q.; PHAN T. T. H.; NGUYEN H. D.; QUANG, L. X. Q.; HANG P. T.; PHI, N. Q.; HOANG V. T.; LINH P. G.; HANG B. T. T. 2023. Predicting Water Quality Index (WQI) by Feature Selection and Machine Learning: A case study of An Kim Hai irrigation system. *Ecological Informatics*. V 74, .2023

LAUREAU, C. C.; CAGNON, C.; LAUGA, B.; DURAN, R. (Ed.). Microbial Ecotoxicology. *Springer International Publishing*, 2017.

LICURGO, F. M., DA SILVA, A. A., & BILA, D. M. Avaliação de contaminantes emergentes no rio Guandu, estado do Rio de Janeiro (Brasil). In: *XVII Simpósio LusoBrasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Santa Catarina*, 2016. Anais: IV-091. Rio de Janeiro: UERJ, 2016.

MARTINS, C.R.; PEREIRA, P.A.P.; LOPES, W.A. e ANDRADE, J.B. Ciclos globais de carbono, nitrogênio e enxofre. Cadernos temáticos de Química Nova na Escola – *Química, Vida e Ambiente*. vol. 8. p. 28 a 41, 2003.

MATOMELA, N. H., CHAKONA, A., & KADYE, W. T. Comparative assessment of macroinvertebrate communities within three afro-montane headwater streams influenced by different land use patterns. *Ecological Indicators*, 2021.

MENDONÇA, A. S. F.; REIS, J. A. T. Utilização de modelo computacional na análise de limites impostos aos parâmetros de qualidade de água em rios. *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, 13, Belo Horizonte, MG. 1999.

NCUBE S., BEEVERS L., & MOMBLANCH A. Towards Intangible Freshwater Cultural Ecosystem Services: Informing Sustainable Water Resources Management. *Water*, 2021.

PAULA, IERO XAVIER DE. Segurança hídrica para abastecimento urbano perante condições ambientais e qualidade da água do manancial: o caso da ETA Guandu, RMRJ. *Dissertação de mestrado – Universidade Estadual do Rio de Janeiro*. 2022.

RAITIF, J., PLANTEGENEST, M., AGATOR, O., PISCART, C., & ROUSSEL, J.-M.. Seasonal and spatial variations of stream insect emergence in an intensive agricultural landscape. *Science of the Total Environment*, 2018.

RAND, G.A. Fundamentals of aquatic toxicology. Effects environmental fate, and risk assessment. 2a. Editon. CRC Press. 1995. 1125p.

RODRIGUES, M. C. Sobre leptospirose e informação: ampliando os conceitos de negligência em saúde. *Arquivos Brasileiros de Ciências da Saúde*, v. 42, n. 1, p.45-49, 2017.

SACRAMENTO, E. B. et al. Avaliação do potencial citotóxico e genotóxico de águas da Bacia do rio Paraíba do Sul-RJ através do sistema teste *Allium cepa*. *Revista Ambiente & Água*, v. 15, 2020.

SILVA, J. P.; ZAIA, J. E. Aplicação de ferramentas de geoprocessamento de dados em estudos ecológicos. *International Scientific Journal*, n. 1, v. 14, p. 31 – 41, 2019.

Silva, J.A. Aplicação de indicadores ambientais para o cálculo do IQA (Índice de Qualidade da Água) em zona urbana de Manaus. 2016

VARGAS, R. Mapeamento da Vulnerabilidade a Eventos Extremos no Município de Maricá, RJ. *Trabalho de conclusão de curso–Bacharelado em Ciência Ambiental, Universidade Federal Fluminense. Rio de Janeiro*, p. 82. 2016.

VERSCHOOR, A.M.; VAN DER STAP, I.; HELMSING, N.R.; LÜRLING, M.; VAN DONK, E. Inducible colony formation within the Scenedesmaceae: adaptive responses to infochemicals from two diferente herbivore taxa. *Journal of Phycology*. p. 808-814, 2004.

VIEIRA, I. C. B., & RIBEIRO, E. A. W. Influence of watershed land use on water quality in the state of Santa Catarina, Brazil. *Geography, Environment, Sustainability*. 2022.

VON SPERLING, M. Princípios do Tratamento Biológico de Águas residuárias. 3ª ed. *Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental/UFMG, Belo Horizonte*, MG. 2005.

WHO. Integrating neglected tropical diseases in global health and development: Fourth WHO report on neglected tropical diseases. *World Health Organization*, 2017, 267 p.

ZAGATTO, P.A, BERTOLETTI, E. (Eds.). Ecotoxicologia aquática – Princípios e aplicações. *São Carlos. Editora RiMa*, 2006. 478p.