

771 - TECNOLOGIAS PARA MONITORAMENTO HÍDRICO: AVALIAÇÃO DO USO DA SONDA MPMS NO ENQUADRAMENTO DO CÓRREGO BARNABÉ, INDAIATUBA/SP

Rodrigo Oliveira Werneck⁽¹⁾

Engenheiro Ambiental (UnB) e Mestre em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (UnB).

Mauro Roberto Felizatto⁽²⁾

Engenheiro Químico (UFU), Engenheiro de Segurança do Trabalho (Faculdade Laboro), Mestre e Doutor em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos (UnB). Professor do Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua (UnB).

Lucijane Monteiro de Abreu⁽³⁾

Engenharia Civil (Escola de Engenharia Kennedy), Minas Gerais, com especialização em Engenharia Sanitária e Ambiental (UFMG) e *The Art of Business coaching* (Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey), México. Mestra em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos (UFMG), Mestra em *Sciences et Techniques de L'environnement* (Ecole Nationale des Ponts et Chaussées), e Doutora em *Sciences Chimiques* (Université de Rennes I) na França. Realizou estágio pós-doutoral no *Ministère du Travail et Des Affaires Sociales de La Ville* e no *Ministère du Travail, de l'Emploi et de la Santé*, França. Professora universitária e coordenadora da pós-graduação em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – ProfÁgua (UnB).

Mauro Sérgio Braga⁽⁴⁾

Engenheiro Eletricista (USP), Mestre em Engenharia Elétrica e doutor em Ciências, na área de Microeletrônica (USP). Professor Titular nas áreas de Elétrica, Eletrônica, Mecatrônica e Automação Industrial no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP).

Luiz Eduardo Vicente⁽⁵⁾

Geógrafo e Mestre em Geografia (UNESP). Doutor em Geografia (UNICAMP) e pós-doutor no departamento de Matemática (University of Colorado) e Pesquisador Colaborador no Departamento de Geologia e Recursos Naturais (UNICAMP). Pesquisador Classe A da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA Meio Ambiente).

Endereço⁽¹⁾: Quadra 3 Conjunto 6 Lote 6 Bloco B nº 403, Paranoá Parque (Paranoá) - Brasília – Distrito Federal – 71587-784 - Brasil - Tel: +55 (61) 98198-0428 - e-mail: werneck.row@gmail.com.

RESUMO

A qualidade da água é um aspecto central na gestão integrada dos recursos hídricos, especialmente em contextos urbanos sujeitos a múltiplas pressões ambientais. Este estudo avaliou o desempenho da sonda MPMS (*Multi Parameter Multispectral Sonde*), tecnologia nacional de baixo custo, para o monitoramento in situ da clorofila-a (Chl-a) no Córrego Barnabé, em Indaiatuba/SP. Foram amostrados 20 pontos distribuídos ao longo de 7 km do curso hídrico, representando diferentes condições tróficas. As coletas seguiram protocolos padronizados, com integração dos dados via aplicativo AgroTag, que permitiu o georreferenciamento e a análise espacial dos parâmetros. A sonda MPMS foi comparada ao fluorímetro TriLux, com cinco leituras por ponto, revelando discrepâncias nos valores de Clorofila-a: enquanto o TriLux indicou média de 18,38 µg/L, a MPMS apresentou média de 139,81 µg/L, com 13 pontos acima do limite estabelecido pela Resolução CONAMA 357/2005 para corpos d'água de classe 2. A superestimação foi atribuída a fatores como presença de bolhas, matéria orgânica dissolvida, turbidez, interferência de luz, partículas em suspensão e à feofitina, subproduto da degradação da clorofila. A comparação com dados laboratoriais e sensores comerciais reforçou a importância de calibrações específicas e da complementação com análises tradicionais. A integração com imagens orbitais ampliou a compreensão espacial da qualidade da água no território. Conclui-se que a sonda MPMS representa uma solução promissora para o monitoramento ambiental de baixo custo, com potencial de aplicação em programas de enquadramento de corpos hídricos e no fortalecimento de políticas públicas voltadas à gestão participativa e sustentável da água.

PALAVRAS-CHAVE: Qualidade da água, Enquadramento, Sonda MPMS, Clorofila-a, Turbidez.

INTRODUÇÃO

A qualidade da água constitui um aspecto central na análise da dinâmica dos múltiplos usos dos recursos hídricos, abrangendo desde a manutenção dos ecossistemas até o atendimento às demandas antrópicas, como o abastecimento urbano. Embora o Brasil possua uma das maiores disponibilidades hídricas do planeta, o país enfrenta crescentes conflitos relacionados ao uso da água, frequentemente associados à degradação da qualidade e à consequente redução da disponibilidade hídrica (FONSECA *et al.*, 2020).

O monitoramento da qualidade da água é uma ferramenta estratégica para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos. Contudo, os Sistemas de Informação sobre Recursos Hídricos, embora essenciais, apresentam limitações em sua aplicabilidade, especialmente em contextos de menor escala e com restrições orçamentárias, como na piscicultura de pequeno porte (BRASIL, 2016). Essas limitações geram lacunas espaçotemporais nos dados disponíveis, o que compromete a formulação de diagnósticos precisos e a tomada de decisão eficiente. Mesmo em locais onde há alguma estrutura de monitoramento, a baixa densidade temporal das medições compromete a criação de séries históricas consistentes (SILVA, 2018b).

Nesse cenário, destaca-se a proposta de monitoramento *in situ* por meio de sensores móveis, que viabiliza coletas mais frequentes a custos inferiores aos métodos convencionais baseados em laboratórios ou estações telemétricas (SILVA, 2018a). Essa abordagem permite ampliar a cobertura espacial e temporal do monitoramento utilizando equipamentos mais acessíveis e operacionais.

A relevância de metodologias inovadoras, que conciliem eficácia técnica e viabilidade econômica, é também defendida por Portinho *et al.* (2019), ao analisarem a relação entre a qualidade da água e a atividade aquícola no reservatório de Ilha Solteira. Os autores ressaltam a necessidade de políticas públicas que minimizem os impactos da agricultura intensiva sobre os recursos hídricos, enfatizando a importância de instrumentos de avaliação contínua e de baixo custo.

No que se refere ao desenvolvimento tecnológico, há um desafio adicional: produzir sondas multiparamétricas acessíveis, confiáveis e de alta precisão. Cunha *et al.* (2020) evidenciam essa demanda e propõem o uso de plataformas livres como base para tais dispositivos. A sonda MPMS (*Multi Parameter Multispectral Sonde*), avaliada neste estudo, incorpora sensores multiespectrais que operam por fluorescência e espectroscopia de reflectância, permitindo análises de parâmetros da qualidade da água com alta acurácia (BRAGA *et al.*, 2017).

O presente estudo foi desenvolvido na microbacia do Córrego Barnabé, localizada no município de Indaiatuba (SP), inserida na Zona Hidrográfica 37 da Sub-bacia do Rio Jundiá, que compõe a Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (UGRHI 5). Com 11 km de extensão, o Córrego Barnabé percorre a área urbana da cidade no sentido norte-sul, sendo margeado integralmente pelo Parque Ecológico Municipal.

Essa bacia se encontra integralmente inserida em área urbanizada, onde se concentra a maior parte da população do município. Assim, o córrego assume papel fundamental tanto como manancial quanto como corpo receptor de efluentes urbanos. O Parque Ecológico, concebido em 1992, foi projetado com o objetivo de reordenar a ocupação do entorno do corpo hídrico, que, até 2013, era caracterizado por condições sanitárias precárias (ENGEORPS ENGENHARIA, 2013).

Três décadas após sua implantação, os resultados são perceptíveis: investimentos contínuos em infraestrutura hídrica e saneamento — como a implantação de novas adutoras e emissários, o desassoreamento dos lagos do parque, e ações de recuperação de nascentes — têm promovido melhorias significativas na qualidade ambiental da região (INDAIATUBA, 2023a). Tais esforços demonstram a importância de políticas integradas e de tecnologias acessíveis para o monitoramento e a gestão sustentável dos recursos hídricos urbanos.

OBJETIVOS

Este estudo tem como objetivo avaliar a eficácia da sonda MPMS (*Multi Parameter Multispectral Sonde*) no monitoramento das variáveis Clorofila-a e Turbidez, em condições reais de campo (in situ), no Córrego Barnabé, localizado no município de Indaiatuba/SP. Busca-se validar o desempenho da sonda como ferramenta de apoio ao enquadramento dos corpos d'água, por meio da comparação estatística com equipamentos de referência disponíveis no mercado. Com isso, pretende-se contribuir para o fortalecimento da gestão sustentável dos recursos hídricos e para a mitigação dos impactos ambientais decorrentes da degradação da qualidade da água.

METODOLOGIA UTILIZADA

O presente estudo foi conduzido na microbacia hidrográfica do Córrego Barnabé, localizada no município de Indaiatuba/SP, com o objetivo de validar a aplicação da sonda multissensorial MPMS (*Multi Parameter Multispectral Sonde*) no monitoramento das variáveis Clorofila-a e Turbidez, em condições reais de campo (in situ). A área de estudo abrange aproximadamente 7 km do eixo longitudinal do córrego, o qual atravessa zonas urbanas e periurbanas sujeitas a influências antrópicas significativas, como o lançamento de cargas difusas e pontuais.

Seleção dos Pontos Amostrais

Foram selecionados 20 pontos de amostragem ao longo do curso do Córrego Barnabé, estrategicamente distribuídos para representar diferentes condições tróficas: oligotrófica, mesotrófica e eutrófica. A georreferenciação dos pontos foi realizada com o auxílio do aplicativo AgroTag, que também possibilitou o mapeamento geoespacial das amostras, facilitando a organização dos dados e a posterior análise espacial.

Coleta e Preservação das Amostras

As coletas ocorreram no dia 16 de dezembro de 2022, entre 12h e 15h30, sob condições climáticas estáveis e céu aberto. A amostragem foi realizada na lâmina superficial da água, utilizando-se um balde de aço inoxidável. As amostras foram transferidas para frascos de vidro âmbar com capacidade de 300 mL, protegidos da luz em caixa organizadora, conforme preconizado pelo Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras (BRANDÃO *et al.*, 2011) e pelos Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater – 23ª edição (APHA; AWWA; WEF, 2017).

Análise com a Sonda MPMS

A sonda MPMS (Multi Parameter Multispectral Sonde) foi desenvolvida pela Embrapa Meio Ambiente em parceria com a Poli-USP e o Instituto Federal de São Paulo - IFSP. Trata-se de um equipamento multissensorial que utiliza espectroscopia de reflectância para aferir variáveis como Clorofila-a e Turbidez. Durante a campanha de campo, a sonda foi utilizada em conjunto com o aplicativo AgroTag, de forma simultânea, sendo ambos empregados de maneira integrada: enquanto a sonda realizava as medições in loco, o aplicativo registrava dados geoespaciais, como localização exata, horários de coleta, fotografias e os valores aferidos. Essa integração permitiu a sistematização eficiente dos dados e favoreceu a organização das informações para análises posteriores. A Figura 1 ilustra a sonda MPMS sendo utilizada na análise da qualidade da água de uma amostra do Córrego Barnabé.

Após a conclusão das 20 coletas, as amostras foram analisadas em ambiente controlado, utilizando a sonda MPMS imersa em frascos de vidro de 300 mL cobertos com papel alumínio, com o intuito de evitar interferência luminosa. As medições serviram para comparar os resultados obtidos com os sensores Trilux (para Clorofila-a) e Hanna (para Turbidez). Por fim, os dados foram confrontados com os limites estabelecidos para a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357, de 2005.

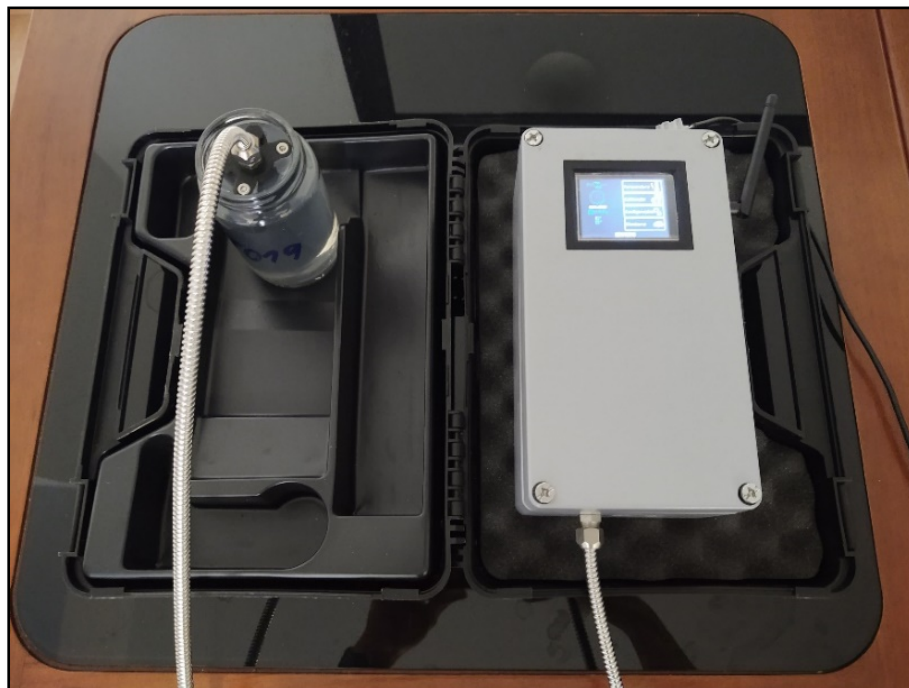


Figura 1 -Sonda MPMS analisando a qualidade da água de uma amostra do Córrego Barnabé.

Variáveis Analisadas

A variável Clorofila-a foi mensurada pela sonda MPMS e comparada com os valores obtidos pelo fluorímetro TriLux. Para cada ponto amostral, foram realizadas cinco medições com ambos os equipamentos, sendo utilizada a média como valor representativo. Os pontos foram organizados em três trechos ao longo do curso do córrego:

- Trecho 1 (Pontos 1 a 7): próximo à nascente, região de montante;
- Trecho 2 (Pontos 8 a 15): região central do curso;
- Trecho 3 (Pontos 16 a 20): localizado no bairro Jardim Morada do Sol, próximo à estação de tratamento de esgoto (ETE) do tipo lodos ativados e ao ponto de captação de água para abastecimento público.

De maneira semelhante, a variável Turbidez foi analisada com a sonda MPMS e comparada aos resultados do turbidímetro Hanna, com cinco leituras por ponto e posterior cálculo da média.

Análise Estatística

Para a análise estatística dos dados obtidos por sensores em campo, foi utilizado o teste t-Student para comparação entre as médias de concentração de Clorofila-a e Turbidez, considerando um nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$). O teste permite verificar se existem diferenças estatisticamente significativas entre os métodos utilizados. A comparação foi realizada entre os resultados obtidos pela sonda MPMS, o fluorímetro digital TriLux e o turbidímetro HANNA, considerando diferentes faixas de concentração amostradas. A decisão estatística baseou-se tanto no valor-p quanto na estatística t, permitindo aceitar ou rejeitar a hipótese nula (H_0) de igualdade entre as médias comparadas. Complementarmente, foi aplicado o teste de tendência de Mann-Kendall com o estimador de inclinação de Sen para identificar possíveis tendências nos dados anuais, conforme proposto por Salmi *et al.* (2002)

Tratamento Espacial dos Dados

Os resultados obtidos foram espacializados com o apoio de imagens de satélite e arquivos vetoriais (shapefiles) da bacia hidrográfica, dos trechos do Córrego Barnabé e dos valores de Clorofila-a e Turbidez. A visualização foi realizada no software ArcGIS 10.8 (ArcMap), permitindo a sobreposição das variáveis em formato raster e vetor para melhor compreensão da dinâmica espacial da qualidade da água ao longo do córrego.

Os pontos de coleta foram escolhidos de forma a garantir ampla variabilidade espacial, refletindo a heterogeneidade trófica da microbacia. A Figura 2 apresenta a distribuição dos pontos e a localização da área de estudo na bacia do Córrego Barnabé.

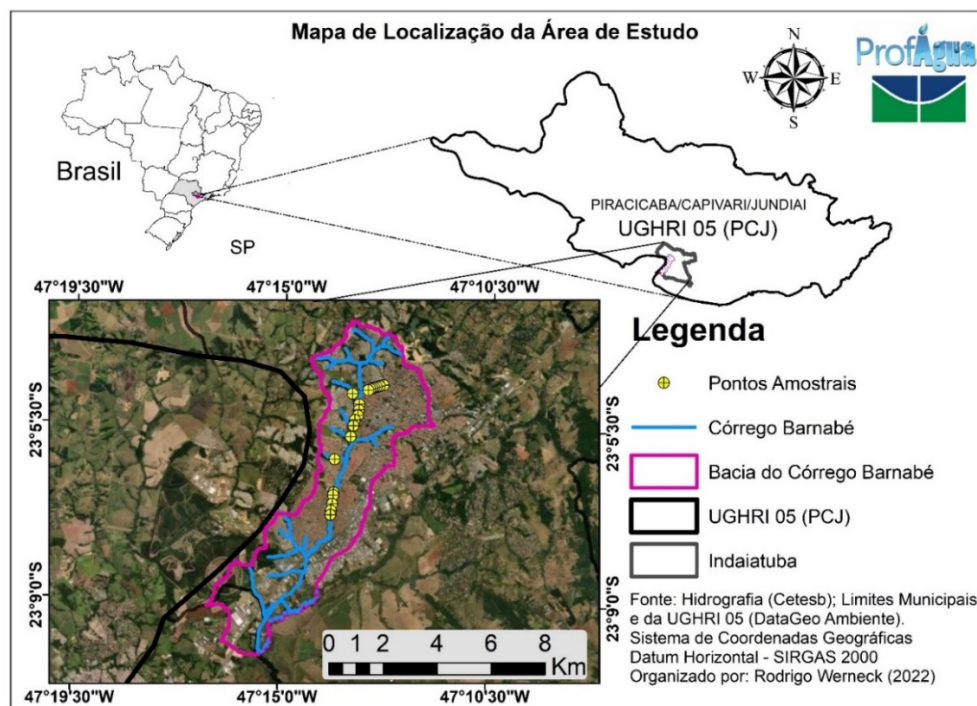


Figura 2 - Mapa de Localização da Área de Estudo na Bacia Hidrográfica do Córrego Barnabé.

Atendimento ao Enquadramento

O Córrego Barnabé é classificado como Classe 2 para águas doces, conforme o Decreto Estadual de São Paulo nº 10.755/1977, permitindo seu uso para abastecimento humano após tratamento convencional. Com base nisso, as concentrações de Clorofila-a e Turbidez obtidas nos 20 pontos amostrais, no sentido do fluxo natural do córrego, foram comparadas aos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005, a fim de verificar a conformidade dos dados com o enquadramento ambiental vigente (BRASIL, 2005).

A Resolução define, para a Classe 2, limite máximo de 30 µg/L para Clorofila-a e 100 NTU para Turbidez. Assim, buscou-se avaliar se os dados obtidos pelas sondas seriam suficientes para indicar a classificação do corpo hídrico em relação aos usos preponderantes definidos pelo enquadramento legal.

As concentrações de Clorofila-a no Córrego Barnabé apresentaram grande variação entre os 20 pontos amostrados e entre os dois sensores avaliados, conforme mostrado na Figura 3. O fluorímetro TriLux registrou a menor concentração no ponto 5 (2,125 µg/L), localizado no primeiro trecho do córrego, enquanto o valor máximo foi observado no ponto 12 (37,77 µg/L), no trecho central. Por outro lado, a sonda MPMS apresentou sua menor concentração no ponto 4 (3,42 µg/L) e a maior também no ponto 12, atingindo 250,49 µg/L. A Figura 3 ilustra a variação dos valores registrados por ambas as sondas em cada ponto amostral.

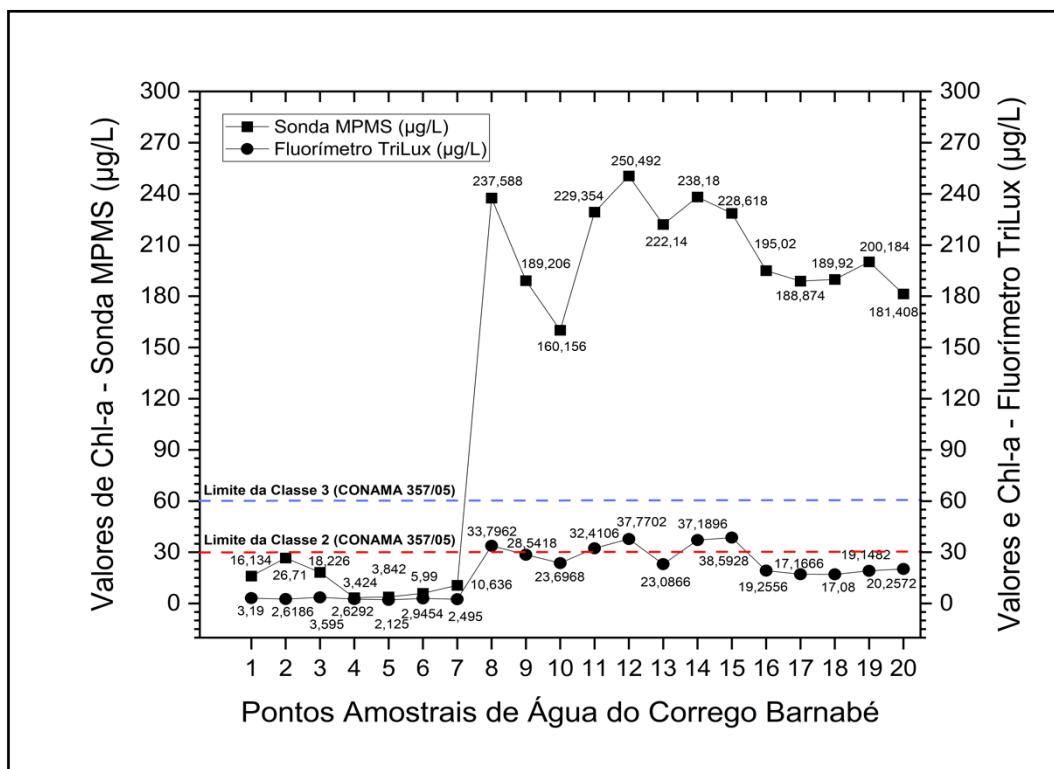


Figura 3 - Valores de Clorofila-a obtidos pela Sonda MPMS e pelo Fluorímetro TriLux para cada ponto amostral do Córrego Barnabé, Indaiatuba-SP.

Essa discrepância pode ser atribuída às características ambientais específicas de cada trecho do córrego. O trecho inicial, mais próximo à nascente, apresentou menores concentrações de Clorofila-a devido à menor presença de matéria orgânica. Em contraste, o ponto 12 — situado na área central da cidade, próximo à prefeitura de Indaiatuba — recebe aporte significativo de poluição difusa e pontual, o que contribui para o aumento das concentrações de Clorofila-a.

A média registrada pelo fluorímetro TriLux foi de 18,38 µg/L, com cinco pontos (8, 11, 12, 14 e 15) ultrapassando o limite de 30 µg/L estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para corpos d'água de classe 2. Já a sonda MPMS apresentou uma média muito superior, de 139,81 µg/L, com 13 pontos (8 a 20) em desconformidade com esse limite, conforme exposto na Figura 2. Os valores elevados obtidos pela MPMS, especialmente entre os pontos 8 e 20, podem refletir uma superestimação relacionada à presença de bolhas, matéria orgânica dissolvida, turbidez, interferência de luz e presença do subproduto da degradação da clorofila, a feofitina, como descrito por Choo *et al.* (2018).

Para avaliar estatisticamente a diferença entre os sensores, foi realizado o Teste t de Student bicaudal, considerando duas amostras independentes com variâncias iguais. As hipóteses testadas foram:

- H_0 (Hipótese nula): as médias são iguais.

- H_1 (Hipótese alternativa): ao menos uma das médias é diferente.

A Tabela 1 apresenta a estatística descritiva dos dados de concentração da Clorofila-a obtidos por meio da medição via sensor em campo. A Tabela 2 demonstra os resultados do Teste estatístico t, incluindo o valor t calculado, os graus de liberdade e o valor-p.

Tabela 1: Estatística descritiva relativa aos dados de Clorofila-a ($\mu\text{g/L}$), por meio da aplicação da análise via sensor em campo, com utilização da sonda MPMS e do fluorímetro TriLux.

Estatística descritiva dos dados de campo para Clorofila-a – Análise via Sensor						
Equipamento		Nº total	Média ($\mu\text{g/L}$)	Desvio Padrão ($\mu\text{g/L}$)	Erro Padrão da Média	Mediana ($\mu\text{g/L}$)
Sonda MPMS		20	139,8051	98,6538	22,05966	189,04
Fluorímetro TriLux		20	18,37952	13,4462	3,00666	19,2019
	Diferença	20	121,42558		22,26362	166,4291
	Geral	40	79,09231	92,79089	14,67153	25,2034

Fonte: Elaborado pelo autor no *Software OriginPro* (2023).

Tabela 2: Estatística do Teste-t aplicado na análise via sensor, in situ, para a variável Clorofila-a, no Córrego Barnabé, Indaiatuba-SP.

Estatísticas do Teste-t – Via Sensor – Em Campo			
	$t_{\text{calculado}}$	Graus de Liberdade	Prob> t (p-valor)
Assume que as variâncias são iguais	5,45399	38	3,19201E ⁻⁶
Não assume que as variâncias são iguais (Correção de Welch)	5,45399	19,70568	2,57025E ⁻⁵

Hipótese nula (H_0): média 1 – média 2 = 0. Hipótese alternativa: média 1 – média 2 \neq 0.

Fonte: Elaborado pelo Autor no *Software OriginPro* (2023).

Com base no p-valor de $3,19 \times 10^{-6}$, inferior ao nível de significância adotado ($\alpha = 0,05$), rejeita-se a hipótese nula. Isso indica, com 95% de confiança, que há diferença significativa entre as médias registradas pela sonda MPMS e pelo fluorímetro TriLux. Assim, a capacidade de aferição da Clorofila-a por esses equipamentos não é equivalente, e os dados sugerem que a sonda MPMS não está adequada para medições precisas deste parâmetro em campo, com a atual calibração. Na análise de tendência pelo método não-paramétrico de Mann-Kandell o Z calculado para as séries de Clorofila-a pela sonda MPMS e pelo turbidímetro Trilux, foram de 2,04 ($\alpha = .05$) e de 1,72 ($\alpha = .1$), respectivamente.

As concentrações de Turbidez também variaram consideravelmente entre os 20 pontos amostrados e entre os equipamentos, conforme apresentado na Figura 4. O turbidímetro HANNA registrou a menor concentração no ponto 5 (1,95 uT), no primeiro trecho do córrego, e a maior no ponto 8 (51,8 uT), no segundo trecho. Já a sonda MPMS não detectou turbidez nos pontos 1 a 7, indicando valores de 0,0 uT, por estarem abaixo do limite de detecção determinado pela curva de calibração do sensor. Nos demais pontos, o valor mínimo foi observado no ponto 10 (22,06 uT) e o máximo no ponto 12 (30,43 uT).

Essa variação pode ser explicada pelas diferenças entre os trechos amostrados: o trecho 1, próximo à nascente, exibe baixas concentrações, enquanto os trechos 2 e 3, localizados na região urbana, mostram concentrações mais elevadas, refletindo o impacto das condições do entorno.

A média registrada pelo turbidímetro HANNA HI93703 foi de 31,31 uT, enquanto a da sonda MPMS, de 26,17 uT, valores relativamente próximos. Nenhuma das amostras superou o limite de 100 uT estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para corpos de água de classe 2. No entanto, considerando o limite mais restritivo para a classe 1 (40 uT), 13 amostras aferidas pelo turbidímetro (pontos 8 a 20) estariam em desconformidade.

A sonda MPMS não conseguiu detectar turbidez nos pontos de 1 a 7, provavelmente por os valores estarem abaixo de 10 uT. Esse comportamento sugere subestimação por parte da sonda. Tal diferença pode estar relacionada à tecnologia do turbidímetro HANNA, que adota duas faixas de medição automáticas (valores baixos <50 uT e faixa entre 50–1000 uT), conforme descrito por HANNA INSTRUMENTS (2020a), podendo impactar os valores nos diferentes trechos do córrego.

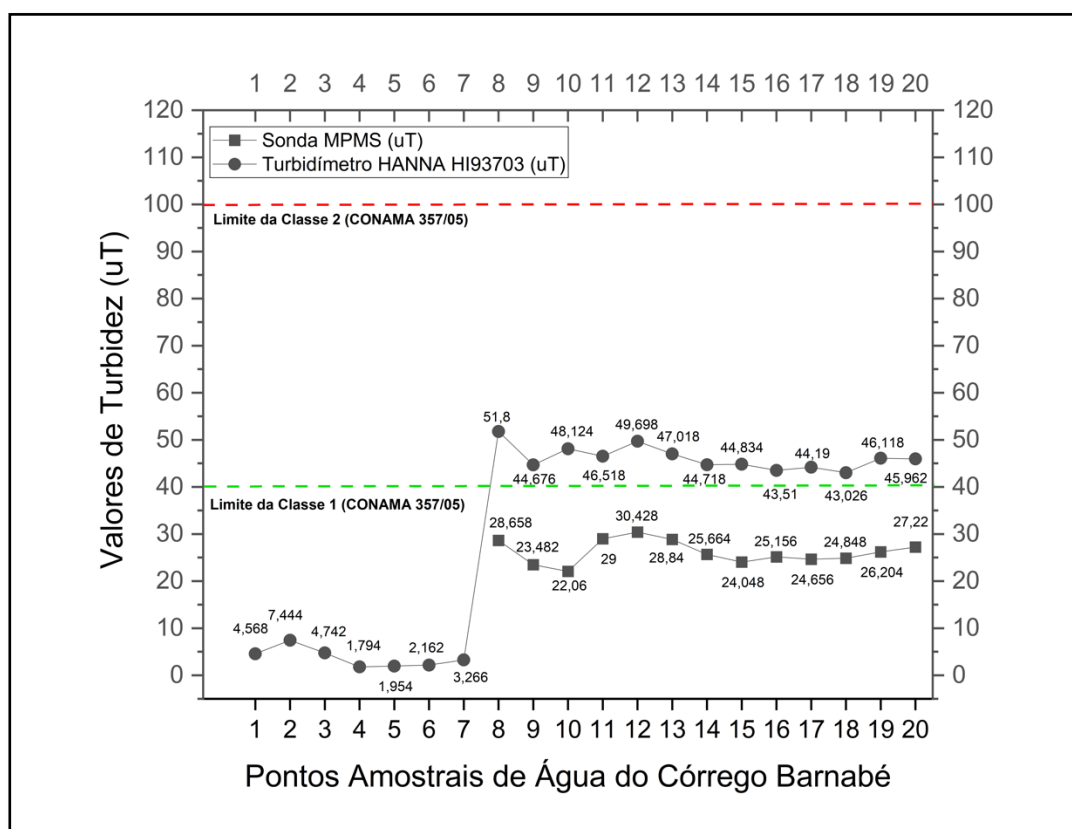


Figura 4: Valores de Turbidez obtidos pela Sonda MPMS e pelo Turbidímetro HANNA para cada ponto amostral do Córrego Barnabé, Indaiatuba-SP.

A Tabela 3 mostra a estatística descritiva para os dois equipamentos, e a Tabela 4 apresenta os resultados do Teste t. O p-valor foi de 0,3877, maior que 0,05, indica que não houve diferença significativa entre as médias. Dessa forma, aceita-se a hipótese nula de igualdade entre as médias. Conclui-se, com 95% de confiança, que ambos os instrumentos apresentam capacidade equivalente para medir turbidez in situ. Assim, a sonda MPMS pode ser considerada validada para esse parâmetro. Na análise de tendência pelo método não-paramétrico de Mann-Kandell o Z calculado para as séries de turbidez pela sonda MPMS e pelo turbidímetro Hanna, foram de 0,00 ($\alpha = .0$) e de 1,72 ($\alpha = .1$), respectivamente.

Tabela 3: Estatística descritiva relativa aos dados de Turbidez (uT), por meio da aplicação da análise via sensor em campo, com utilização do Turbidímetro HANNA e da sonda MPMS.

Estatística descritiva dos dados de Campo para Clorofila-a – Análise via Sensor						
Equipamento		Nº total	Média (uT)	Desvio Padrão (uT)	Erro Padrão da Média	Mediana (uT)
Turbidímetro HANNA		20	31,3061	20,90781	4,67513	44,433
Sonda MPMS		13	26,17415	2,49176	0,69109	25,664
	Diferença		5,13195		5,85752	
	Geral	33	29,28442	16,38178	2,8517	28,658

Fonte: Elaborado pelo autor no *Software* OriginPro (2023).

Tabela 4: Estatística do Teste-t aplicado na análise via sensor, in situ, para a variável Turbidez, no Córrego Barnabé Indaiatuba-SP.

Estatísticas do Teste-t – Via Sensor – Em Campo			
	t _{calculado}	Graus de Liberdade	Prob> t (p-valor)
Assume que as variâncias são iguais	0,87613	31	0,3877
Não assume que as variâncias são iguais (Correção de Welch)	1,08591	19,82444	0,29055

Hipótese nula (H0): média 1 – média 2 = 0. Hipótese alternativa: média 1 – média 2 > 0.

Fonte: Elaborado pelo Autor no *Software* OriginPro (2023).

As médias de turbidez obtidas pelos dois equipamentos foram representadas em gráficos de barras sobre uma imagem de satélite (Figura 5). Os dados da sonda MPMS são apresentados em bege e os do turbidímetro HANNA em roxo, permitindo a comparação visual ao longo do gradiente longitudinal do córrego Barnabé. Essa visualização facilita a identificação dos pontos com maiores concentrações de turbidez e a localização espacial desses trechos.

A sonda MPMS apresentou, em todos os pontos, valores ligeiramente inferiores aos do turbidímetro HANNA. Essa diferença pode decorrer de interferências típicas em amostras de turbidez, como a presença de sólidos em suspensão que sedimentam rapidamente, bolhas de ar, vibrações e frascaria inadequada, fatores que afetam a leitura conforme relatado no manual do equipamento HANNA INSTRUMENTS (2020b). Embora o HI93703 cubra uma ampla faixa de medições, para amostras acima de 40 uT recomenda-se a diluição da amostra para melhor precisão.

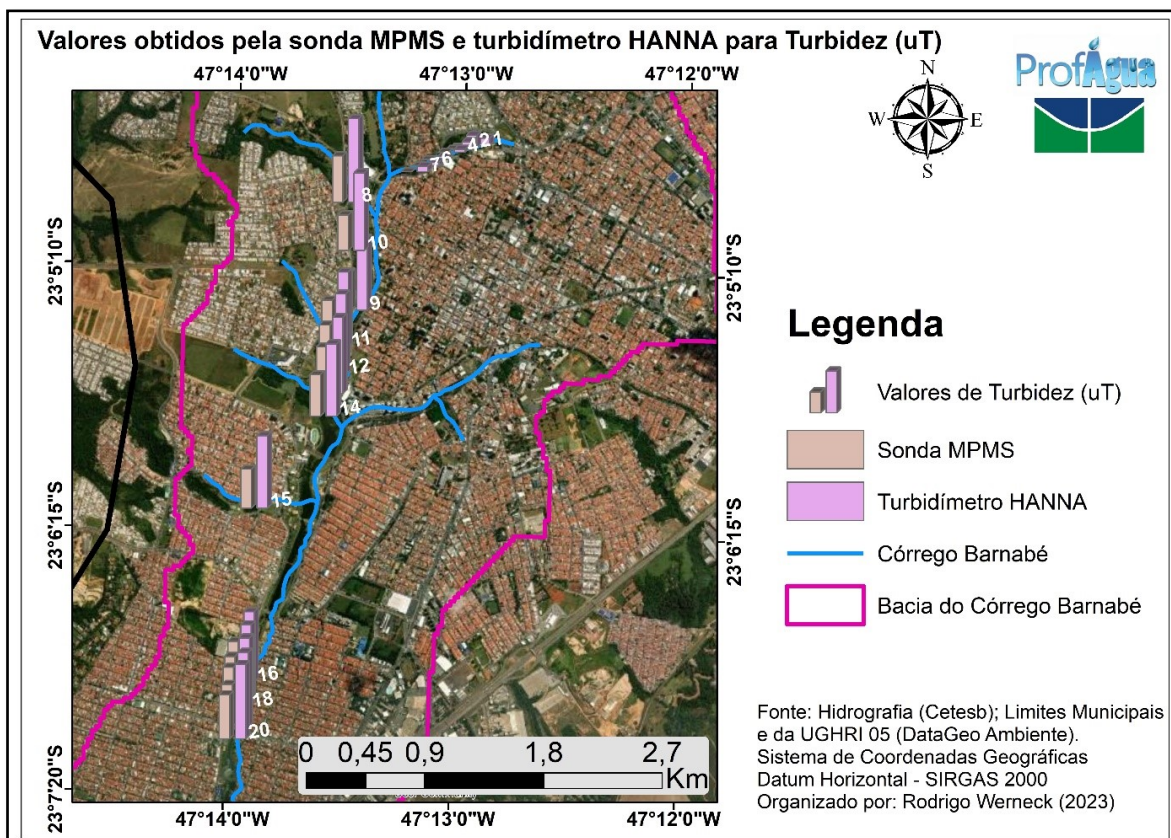


Figura 5: Mapa de localização dos pontos amostrais com a sobreposição do gráfico de barras para a concentração de Turbidez (uT).

Para se ter uma visão holística e realista do local, buscou-se na literatura dados de qualidade da água obtidos pela CETESB em corpos hídricos do município de Indaiatuba. A única estação de monitoramento qualitativo com dados disponíveis foi o ponto localizado sobre a ponte de concreto, logo após a estrada de ferro, no distrito de Itaici, código JUNA 03 270. Essa estação situa-se à jusante na UGRHI 05, no trecho do Rio Jundiá, a aproximadamente 4 km do Córrego Barnabé. Foi realizada uma sistematização dos dados de Turbidez (uT) e de Clorofila-a ($\mu\text{g/L}$) coletados entre 2014 e 2020 pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (Tabela 5). A tabela apresenta a fonte de dados, o código do ponto, o sistema hídrico, a localização do ponto, o ano de amostragem, a descrição da variável comparada, a unidade de medida, o limite estabelecido e a classe de acordo com a Resolução CONAMA 357/05, os valores coletados nos meses de fevereiro, abril, junho, agosto, outubro e dezembro, além da média anual de cada variável.

Os dados históricos obtidos pela CETESB no ponto JUNA 03 270 funcionam como uma referência sólida para a faixa de valores que podem ser aferidos pela sonda MPMS, cuja sensibilidade permite capturar variações de qualidade da água em tempo real e com alta resolução. Vale destacar, nesse sentido, o valor de $329,7 \mu\text{g/L}$ de Clorofila-a registrado em fevereiro de 2014, que supera os valores máximos detectados pela sonda MPMS no Córrego Barnabé. Esse dado evidencia que, mesmo em corpos hídricos distintos, mas hidrologicamente conectados e sob condições ambientais excepcionais, é possível ocorrerem concentrações elevadas de clorofila-a. Assim, reforça-se a relevância da utilização de equipamentos como a MPMS para a captação de dados de maneira contínua e representativa, contribuindo com diagnósticos mais robustos para o enquadramento de corpos d'água.

Tabela 5: Valores de Turbidez (uT) e de Clorofila-a ($\mu\text{g/L}$) coletados pela CETESB no ponto JUNA 03 270 no Rio Jundiá entre 2014 e 2020, no município de Indaiatuba, São Paulo.

Código do Ponto: 76 - 0 0 SP 05 353 JUNA 03 270					Sistema Hídrico: Rio Jundiá - UGRHI 05						
Localização: a ponte de concreto, logo após a estrada de ferro, no distrito de Itaici, em Indaiatuba - SP											
Ano	Variável	Und.	Limite do Padrão	Classe CONAMA	Fev.	Abr.	Jun.	Ago.	Out.	Dez.	Média
2014	Turbidez	uT		4	28	116	14	11	7	12	31,33
	Clorofila-a	µg/L			329,7		6,7	8,9		76,6	105,48
2015	Turbidez	uT	< 100	3	107	9	12	6	8	363	84,17
	Clorofila-a	µg/L	<60		6,7		2,7	4,8		3,3	4,38
2016	Turbidez	uT	< 100	3	144	15	19	13	8	358	92,83
	Clorofila-a	µg/L	<60		< 1		2,1	4,9		2,7	2,43
2017	Turbidez	uT	< 100	3	19	10	16	38	189	12	47,33
	Clorofila-a	µg/L	<60		14		< 1	3,9		51,7	17,40
2018	Turbidez	uT	< 100	3	9	12	9	14	100	20	27,33
	Clorofila-a	µg/L	<60		24,6		13,9	1,1		19,9	14,88
2019	Turbidez	uT	< 100	3	42	160	45	15	10	31	50,50
	Clorofila-a	µg/L	<60		< 1		2	2,1		46,6	12,68
2020	Turbidez	uT	< 100	3	66		15		11	4	24,00
	Clorofila-a	µg/L	<60		5,9		2,7		9,8	8,2	6,65

Legenda: Und.: Unidade de Medida. Fonte: Adaptado de (CETESB, 2015, 2019).

O uso do aplicativo AgroTAG destacou-se pela eficiência nas atividades de campo, registrando coordenadas geográficas, imagens dos locais e horários de coleta, além de armazenar automaticamente os dados de Clorofila-a e turbidez na plataforma WebGIS. A integração dessas informações com imagens orbitais possibilitou a visualização das médias de Clorofila-a em gráficos comparativos, diferenciando os dados coletados pela sonda MPMS e pelo fluorímetro TriLux. Observou-se uma discrepância notável entre os dois equipamentos, especialmente no ponto 12, onde a diferença atingiu 212,72 $\mu\text{g/L}$. Essa variação pode ser atribuída às especificações técnicas do TriLux, que apresenta menor suscetibilidade à interferência ambiental, ao passo que a sonda MPMS é mais sensível a tais fatores (AGSOLVE, 2021).

Os resultados obtidos demonstram a importância de compreender as limitações e vantagens de cada instrumento, bem como as condições ambientais e as características dos pontos de coleta, a fim de assegurar a confiabilidade dos dados. A aplicação de ferramentas como o AgroTAG, aliada à integração com plataformas WebGIS, reforça o potencial para análises mais abrangentes e precisas, fundamentais para o monitoramento e a gestão dos recursos hídricos.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O estudo de caso realizado no Córrego Barnabé avaliou a performance da sonda MPMS para o monitoramento de clorofila-a e turbidez em condições reais de campo e demonstrou que, apesar do seu potencial para aplicações in situ, com portabilidade, custo acessível e análise simultânea de múltiplas variáveis sem o uso de reagentes químicos, a sonda apresentou resultados significativamente discrepantes na medição de clorofila-a em comparação ao fluorímetro Trilux, com p-valor de $3,19201 \times 10^{-6}$ ao nível de significância de 5%, o que indica baixa precisão e necessidade de aprimoramentos na calibração, especialmente para medições em águas mais límpidas. Essa superestimação da clorofila-a pode estar associada à presença de bolhas, interferência de luz, turbidez, matéria orgânica dissolvida, sólidos em suspensão e à presença da feofitina, um subproduto da degradação da clorofila.

Os dados obtidos mostraram que a sonda MPMS excedeu os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 357/05 em 13 pontos amostrais, apresentando concentrações elevadas de clorofila-a incompatíveis com corpos hídricos de classe 2, indicando a necessidade de ajustes técnicos para uso em ambientes mesotróficos e eutróficos.

Em contrapartida, para a variável turbidez, a sonda MPMS apresentou dados compatíveis com o turbidímetro Hanna, com p-valor de 0,3877 ao nível de significância de 5%, embora tenha limitado sua precisão em valores abaixo de 20 UT, o que comprometeu as leituras em 35% dos pontos amostrados, reforçando a importância de mais testes com amostras de baixa turbidez. Na análise de tendência pelo método não-paramétrico de Mann-Kandell, de todas as séries medidas, a única série que apresentou tendência, com nível de significância ($\alpha = .05$) foi a de Clorofila-a medida pela sonda MPMS, evidenciado pelas concentrações elevadas de Chl-a nos trechos 2 e 3, localizados à jusante da parte do Córrego Barnabé que foi estudada. Recomenda-se, também, refazer todos os testes de comparação entre a série amostral (sonda *versus* referência no mercado) através de testes não-paramétricos, tipo o Mann-Whitney.

Os dados de turbidez obtidos foram todos compatíveis com os limites da classe 2, segundo a CONAMA 357/05, mostrando que a sonda MPMS pode ser útil como ferramenta de apoio ao diagnóstico da qualidade da água e ao enquadramento de corpos hídricos.

A integração com a plataforma WebGIS AgroTag amplia sua aplicabilidade ao permitir armazenamento em nuvem, coleta de dados georreferenciados em tempo real e vinculação com registros fotográficos, o que facilita o uso por técnicos e pesquisadores.

Como recomendações futuras, propõe-se a realização de mais medições em campo, contemplando diferentes níveis de trofia, a fim de ampliar a representatividade dos dados obtidos. Além disso, sugere-se o uso de padrões laboratoriais de clorofila-a para aprimorar a curva de calibração da sonda, bem como a repetição das análises em pontos de monitoramento oficiais, como o da CETESB (código JUNA03270), com o objetivo de verificar a reprodutibilidade dos resultados.

Recomenda-se também a investigação das possíveis interferências ópticas causadas por partículas suspensas, bolhas e feofitina, uma vez que esses fatores podem impactar diretamente na acurácia das leituras. A realização de testes controlados, avaliando a resposta da sonda diante de diferentes concentrações de matéria orgânica dissolvida e turbidez, contribuiria para um entendimento mais preciso das limitações do equipamento.

Por fim, destaca-se a importância do uso complementar de análises laboratoriais para aumentar a comparabilidade dos dados, reduzir incertezas e melhorar a acurácia dos sensores, promovendo assim o aprimoramento contínuo da sonda MPMS e seu potencial para se tornar uma ferramenta de referência no monitoramento ambiental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APHA; AWWA; WEF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 23rd. ed. Washington DC: American Public Health Association. 2017.

BRAGA, M. S.; JAIMES, R. F. V. V.; BORYSOW, W.; GOMES, O. F. Portable multispectral colorimeter for metallic ion detection and classification. *Sensors (Switzerland)*, v. 17, n. 8, 1 ago. 2017.

BRANDÃO, C. J.; BOTELHO, M. J. C.; SATO, M. I. Z.; LAMPARELLI, M. C. Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos. São Paulo: CETESB; Brasília: CAESB; ANA. 2011.

BRASIL. Sistemas de Informação na gestão de águas: conhecer para decidir. Cadernos de Capacitação. Brasília: ANA. 2016.

_____. Resolução CONAMA no 357, de 17 de março de 2005. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=450. Acesso em: 15 abr. 2025.

CUNHA, R. A.; SILVA, A. G.; NASCIMENTO, L. D.; LIMA, L. S.; BANDEIRA, M. L. F. S. Polypus: Sonda de Baixo Custo para Análise de Parâmetros Físico-Químicos em Águas Superficiais. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, v. 9, n. 4, p. 653–671. 2020.

ENGEORPS ENGENHARIA. Elaboração do Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB) do Município de Indaiatuba, Produto 2 - Diagnóstico da Situação da Prestação dos Serviços de Saneamento Básico. Barueri-SP: Engecorps Engenharia S.A., 2013. Disponível em: <https://www.indaiatuba.sp.gov.br/engenharia/pmsb-pgirs/>. Acesso em: 10 abr. 2025.

FONSECA, E. R.; MODESTO, F. A.; CARNEIRO, G. C. A.; LIMA, N. F. S.; MONTE-MOR, R. C. A. Conflitos pelo uso da água na Bacia Hidrográfica do rio São Francisco - Estudos de caso no Estado da Bahia. *Research, Society and Development*, v. 9, n. 9, p. 19. 2020.

INDAIATUBA. PREFEITURA DE INDAIATUBA. SAAE faz balanço positivo do ano de 2022. Disponível em: <https://www.indaiatuba.sp.gov.br/comunicacao/imprensa/noticias/31842/saae-faz-balanco-positivo-do-ano-de-2022>. Acesso em: 9 abril. 2025.

ORIGIN PRO. Programa de Computador Origin Pro 2023. OriginLab®. Disponível em: <https://www.originlab.com/demodownload.aspx>. Acesso em: 15 abr. 2025.

PORTINHO, J. L.; GOMES, A. C. C.; VICENTE, A. K.; SILVA, M. S. G. M.; ARAUJO, L. S.; LOSEKANN, M. E.; SAULIN, H. H. L.; MANZATTO, C. V.; VICENTE, L. E. Desenvolvimento e Validação de Metodologias Multissensor/Multiescala para coleta, análise e disponibilização de dados de qualidade de água em áreas aquícolas: o caso de Ilha Solteira no contexto projeto componente manejo e gestão ambiental da aquicultura. Goiânia: SAMA/UEG, 2019. p. 179–198.

SALMI, T., MAATTA, A., ANTTILA, P., RUOHO-AIROLA, T., & AMNELL, T. Detecting Trends of Annual Values of Atmospheric Pollutants by the Mann-Kendall Test and Sen's Slope Estimator—The Excel Template Application. Helsinki: Finnish Meteorological Institute. 2002.

SILVA, J. R. Desenvolvimento de sensores químicos de baixo custo visando ao monitoramento da qualidade e da potabilidade de águas. São Paulo: Universidade de São Paulo. 2018a.

SILVA, R. L. L. Monitoramento da qualidade da água em tempo quase-real: uma alternativa para a gestão de recursos hídricos. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2018b.