

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

MONTAGEM DE VEÍCULO AQUÁTICO CONTROLADO REMOTAMENTE PARA HIDROMETRIA: MEDIÇÕES DE VAZÃO E QUALIDADE D'ÁGUA

Andrei Chadanowicz¹; José Eduardo Gonçalves²; Danieli Mara Ferreira³; Danilo Mildemberger de Oliveira⁴; Luiz Fernando Gonçalves Grodzki⁵; Jorge Antonio Mercanti⁶; Patrícia Gobet de Aguiar Barufaldi⁷; Eduardo Cuoco Léo⁷; Ana Oliveira⁸& Débora Lavoura⁹.

Abstract: The execution of hydrometric and water quality measurements faces limitations related to the installation and movement of sensors within the water body during monitoring. As an alternative to manned boats, a remotely operated vehicle was developed to perform these measurements. Three experiments were conducted to evaluate the vehicle's performance in measuring water quality while in motion, the stability of the sensor, and the potential to replace conventional hydrometric methods. The results indicate that the vehicle can replace manned methods, and that water quality measurements taken in motion do not differ significantly from those obtained under static conditions.

Resumo: A realização de medições hidrométricas e de qualidade da água enfrenta limitações relacionadas à instalação e ao deslocamento de sensores no corpo hídrico durante o monitoramento. Como alternativa aos barcos tripulados, foi desenvolvido um veículo controlado remotamente para executar essas medições. Foram conduzidos três experimentos com o objetivo de avaliar o desempenho do veículo na medição da qualidade da água em movimento, a estabilidade do sensor e a possibilidade de substituição do método convencional de hidrometria. Os resultados indicam que o veículo pode substituir métodos tripulados e que as medições de qualidade da água em movimento não diferem significativamente das realizadas em condições estáticas.

Palavras-Chave – Hidrometria; veículo aquático; medição de qualidade de água.

¹⁾ Simepar: andrei.chadanowicz@simepar.br

²⁾ Simepar: jose.goncalves@simepar.br

³⁾ Simepar: danieli.ferreira@simepar.br

⁴⁾ Simepar: danilo.mildemberger@outlook.com

⁵⁾ Simepar: luiz.grodzki@simepar.br

⁶⁾ Comitês PCJ: jorgemercanti@gmail.com

⁷⁾ Agência das Bacias PCJ: eduardo.leo@agencia.baciaspcj.org.br

⁸⁾ Agência das Bacias PCJ: ana.oliveira@agencia.baciaspcj.org.br

⁹⁾ Agência das Bacias PCJ: debora.lavoura@agencia.baciaspcj.org.br

INTRODUÇÃO

Hidrologia é a área da ciência responsável por estudar o ciclo da água na natureza, compreendendo seu funcionamento e os efeitos que dele decorrem. Esse conhecimento é fundamental para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos, pois permite suprir de forma eficiente as necessidades das cidades, das atividades industriais e das plantações. A água, nesse contexto, é utilizada tanto para o consumo humano quanto para a irrigação de culturas e o atendimento a demandas industriais. Diante disto, torna-se essencial conhecimento dos recursos hídricos disponíveis nas proximidades das comunidades, para que seja possível planejar diante do crescimento populacional, da escassez hídrica e de possíveis enchentes.

Assim, torna-se necessária a observação dos fenômenos hidrológicos, quantificados através da coleta de dados que expliquem o que está acontecendo. A hidrometria consiste nesta coleta de dados hidrológicos, a saber chuva e vazão de rios (Kobiyama 2011). Dados contínuos de chuva são usualmente coletados por meio pluviômetros e pluviógrafos. Dados de vazão, por sua vez, são estimados através de diversos equipamentos, como molinete, *Acoustic Doppler Velocimeter* (ADV) e *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP).

A qualidade da água, assim como sua disponibilidade quantitativa, é um fator essencial para o uso por seres humanos, animais e plantas. Para ser considerada apropriada ao consumo e a outras finalidades, a água deve atender a critérios estabelecidos de qualidade. A introdução de substâncias poluentes pode comprometer esses critérios, tornando a água inadequada para uso antrópico e ecológico.

A matéria poluente encontrada em corpos d'água pode ser decomposta ao longo do tempo por agentes microbióticos. A capacidade de decompor a matéria orgânica presente no meio aquático é limitada pela presença de oxigênio dissolvido (OD) no meio. Por isso, o oxigênio dissolvido é um parâmetro indicador de qualidade da água: quanto maior a concentração de OD na água, menor é a quantidade de matéria orgânica presente sendo decomposta.

Devido à maior facilidade de mensurar a concentração de OD na água ao invés da matéria orgânica total, a concentração de OD na água é utilizada como parâmetro de qualidade. Tal concentração pode ser estimada *in situ*, comumente com sensores óticos por membrana.

O transporte de sensores ao longo do rio pode ser trabalho e problemático dependendo da morfologia do corpo d'água. Muitas vezes são necessários barcos para que se chegue ao ponto necessário no rio para fazer a medição ou para rebocar o equipamento, o que demanda logística de campanha e custo de combustível. Adicionalmente, em alguns casos, o acesso à margem é difícil devido à presença mata ciliar. Uma alternativa para medições à distância é ideal.

Neste contexto, o presente estudo propõe-se uma alternativa a partir de um veículo não tripulado, controlado remotamente, que transporta os sensores de vazão e de OD para realizar as medições. Desta forma, podem-se medir parâmetros em corpos hídricos de difícil acesso, e realizar mais medições ao longo do espaço.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A montagem e utilização de barcos controlados remotamente para medições com ADCP já foi realizada anteriormente com sucesso (Singh, 2024; Zhou, 2025), eles apresentam mais segurança que um barco tripulado no corpo d'água e também são mais econômicos e menos poluentes por utilizar energia proveniente de baterias elétricas em vez de combustíveis. Alguns desses, inclusive, funcionam autonomamente com percursos programados (Brown, 2011; Sotelo-Torres, 2023).

O ADCP utilizado, do modelo RS5, pode ser utilizado em veículos móveis, como pode ser visto no seu manual (SONTEK 2020). E por ser pequeno, em contraste com outros modelos, é comumente utilizado para medições com barcos móveis, ao invés do modo fijo. O próprio ADCP vem com uma prancha para ser rebocada realizando medições ao longo do percurso.

Muitos desses veículos com ADCP são feitos utilizando barcos com propulsão via hélice submersa. Esses designs podem ter problemas com obstáculos subaquáticos, águas rasas e altas velocidades d'água. Em vez disso, podemos utilizar uma montagem com propulsão aérea, como foi realizado por Regina (2021) e evitar esses problemas.

O monitoramento de OD também já foi realizado em rios anteriormente. Porém de maneira fixa (Le Coz 2008). As medições utilizando um sensor acoplado a um veículo foram realizadas anteriormente também (Huang 2018, Despax 2023).

MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente foi realizada a montagem do veículo para ser controlado remotamente. A prancha de arrasto, feita para utilização do ADCP RS5, foi utilizada como modelo para a montagem do veículo remoto.

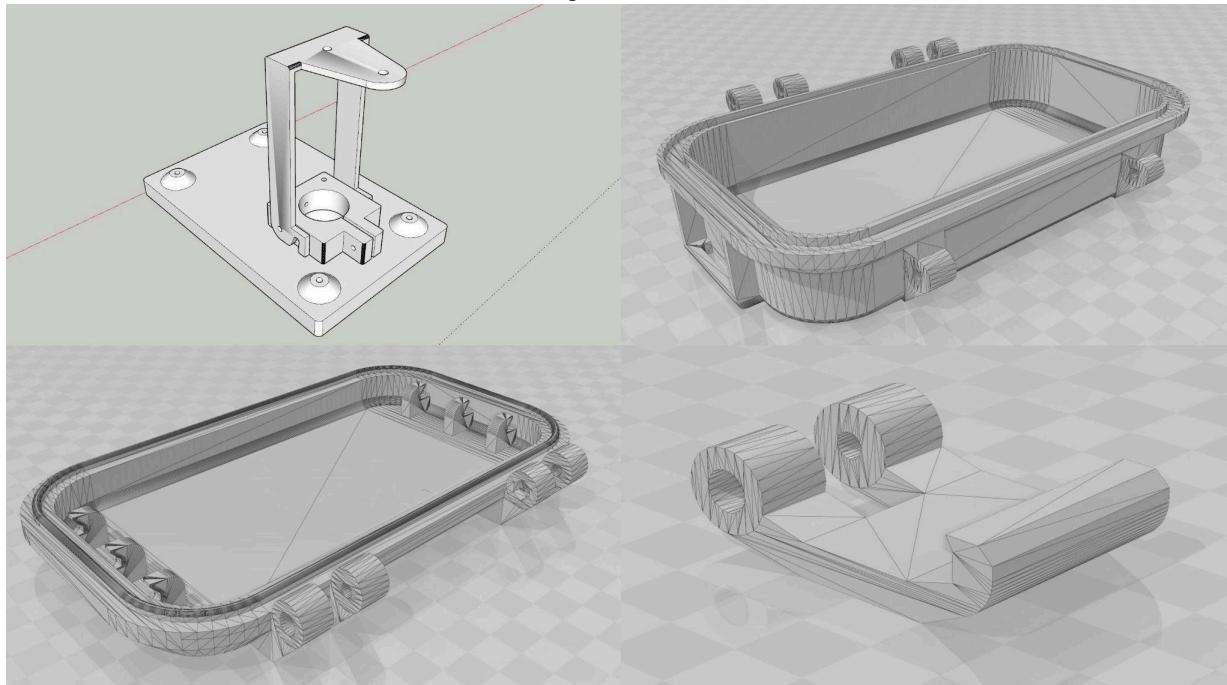
Foi montada uma prancha de *bodyboard* com um orifício central com o mesmo diâmetro do ADCP, onde o mesmo foi acoplado. Um suporte para o equipamento e para o dispositivo de Global Navigation Satellite System (GNSS) foram modelados via SketchUp (Figura 1) seguindo as dimensões da prancha de arrasto original e impressos utilizando uma impressora 3D para ser acoplado à prancha. Uma caixa também foi impressa para manter os equipamentos eletrônicos protegidos da água. Dentro desta caixa, se encontra o receptor de rádio, a bateria e a placa de circuitos de um microcontrolador ESP32.

Para locomoção, foi utilizado um motor elétrico com uma hélice de propulsão, também impressa em 3D. O motor e os servos dos lemes direcionais são conectados ao rádio para que possam ser controlados remotamente.

Foi desenvolvida, ainda, uma placa de circuito integrado com o objetivo de captar dados de localização, data e hora, OD, pressão barométrica, temperatura e salinidade mensurados pelo sensor. O circuito é composto por um microcontrolador ESP32, interligado a um módulo GNSS compatível com os sistemas Global Positioning System (GPS), GLONASS, Galileo e BeiDou. Além disso, inclui um módulo conversor de TTL para RS-485, responsável pela comunicação com o sensor ODO, e um conversor *step-down*, que regula a

voltagem da bateria para 5V. No microcontrolador existe um botão para iniciar e parar a coleta de dados, sendo os dados armazenados na memória local. O sensor de concentração de OD, por sua vez, foi calibrado de acordo com o manual de instruções anteriormente às medições em campo.

Figura 1 – Modelos computacionais das peças impressas em 3D: primeira imagem, da esquerda para a direita, de cima para baixo: suporte para o ADCP RS5 e sistema de GNSS, segunda imagem: parte de baixa da caixa protetora dos componentes eletrônicos, terceira imagem: parte superior da caixa protetora e quarta imagem: trava para a caixa protetora.



A validação do funcionamento do veículo foi realizada através de diversas medições em campo utilizando o ADCP para vazão, com o sensor de qualidade da água acoplado. Foram realizadas três campanhas de campo diferentes, a fim de quantificar as medições realizadas pelo sensor de qualidade de água. As duas primeiras medições foram realizadas em lagos artificiais com trajetos de medição controlado, com o objetivo de verificar divergências na medição enquanto parado e em movimento.

Ao início da segunda medição, o veículo foi mantido estático por aproximadamente 1 minuto em três diferentes pontos para realizar as medições de maneira estática; em seguida, foram realizadas medições em movimento passando pelos mesmos pontos e também em outras regiões do corpo d'água. Foram realizadas medições de concentração de OD e temperatura da água para cálculo da porcentagem de saturação de OD na água através das equações 1 e 2 de Thomann (1989):

$$C_s = e^{-139,34411 + \frac{1,575701 \cdot 10^5}{T} - \frac{6,642308 \cdot 10^7}{T^2} + \frac{1,2438 \cdot 10^{10}}{T^3} - \frac{8,621949 \cdot 10^{11}}{T^4}} \quad (1)$$

$$S_{OD} = \frac{C_{OD}}{C_s} \times 100\% \quad (2)$$

onde C_s representa a concentração de saturação do oxigênio na água, T é a temperatura da água, C_{OD} é a concentração de OD na água e S_{OD} é a porcentagem de saturação de OD na água.

Para quantificar a diferença entre as duas medições (estática e em movimento) realizadas nas duas primeiras campanhas, foi segmentado o espaço de medições em células de 10 metros por 10 metros, e calculada a média aritmética de todas as medições realizadas dentro de cada quadrícula. Em seguida, foram calculadas as anomalias de cada medição em relação às células onde foram feitas.

Para o terceiro caso, foi realizada uma medição de vazão de acordo com o recomendado pelo manual do ADCP, medindo a transversalmente o Rio Atibaia no município de Atibaia; simultaneamente, utilizou-se o sensor de qualidade da água, a fim de verificar a qualidade da água na seção transversal do rio. O ADCP é conectado com o software RSQ da Sontek, que grava as medições de velocidade e calcula automaticamente a vazão da seção transversal.

Enquanto o ajuste da seção transversal para as medições de vazão é realizada pelo software proprietário do ADCP, RSQ, o ajuste da seção transversal para as medições de qualidade da água deve ser manual. Para fazer isso foi realizada a regressão linear dos pontos de medição para ajustar uma reta, que define a seção transversal; em seguida, os pontos de medição são projetados ortogonalmente nessa reta para que cada medição represente um ponto ao longo desta seção transversal.

RESULTADOS

Esta seção descreve os resultados obtidos pela utilização do veículo não tripulado controlado remotamente após sua montagem, conforme descrito anteriormente. Estes resultados são apresentados indicando as duas medições de comparação do sensor de concentração de OD, e uma medição numa seção transversal de rio.

Durante a primeira medição em campo, realizada em um pequeno lago, obteve-se as medições de concentração de OD apresentadas na Figura 2. O trajeto realizado foi inicialmente em uma região concentrada e eventualmente em outras partes do lago. Pode-se observar na imagem das anomalias (terceiro gráfico, da esquerda para direita), que as anomalias são sempre relativamente baixas (entre -0,5 mg/L e +0,5 mg/L) indicando que não há variação entre as medições na mesma região.

Os resultados das medições da segunda campanha podem ser visualizados na Figura 3. Observando as medições de concentração de OD nos dois primeiros gráficos, é possível verificar que o sensor captou corretamente o aumento na concentração na região mais sul do corpo d'água, onde havia uma floração de algas. No gráfico das anomalias, segue como na primeira campanha os valores relativamente baixos (entre -0,5 mg/L e +0,5 mg/L); porém, há alguns percursos onde as anomalias se elevam de valor, especialmente durante nos locais da região sul, onde havia concentração de OD maior que o resto do lago, indicando que há um pequeno período de estabilização do sensor. Alternativamente, o próprio movimento do veículo de medição estava levando água de uma parte do lago para outra.

Figura 2 – Gráficos das medições de concentração de OD realizadas na primeira campanha, apresentados da esquerda para a direita. Primeira imagem: medições de OD sobre imagem de satélite. Segunda imagem: células de 10 metros por

10 metros com o valor médio das medições realizadas em cada região. Terceira imagem: anomalias das medições de OD em relação à média da célula correspondente.

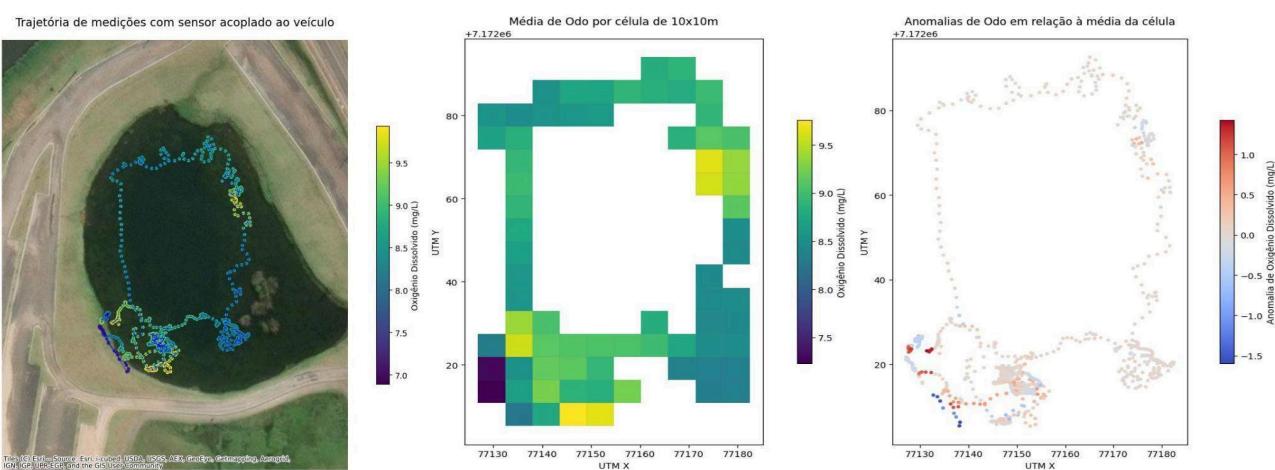
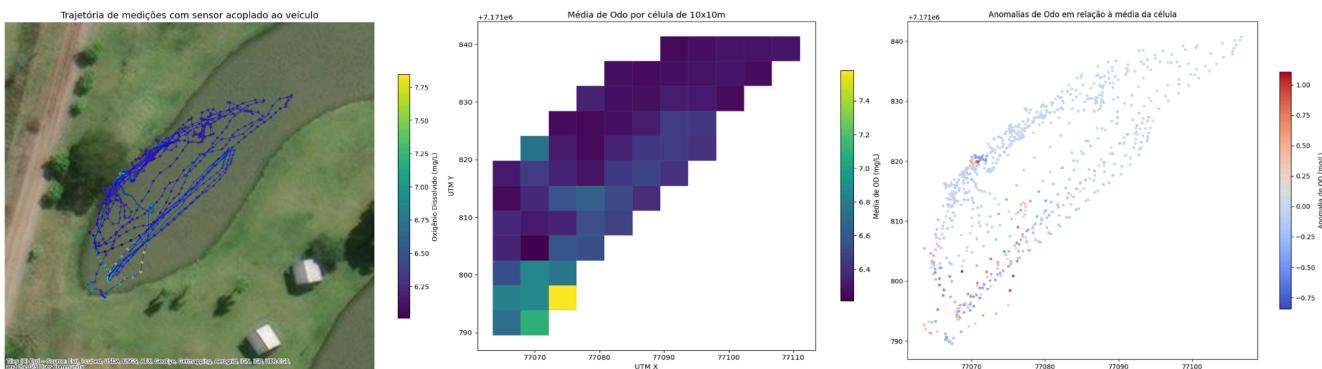


Figura 3 – Gráficos das medições de concentração de OD realizadas na segunda campanha, apresentados da esquerda para a direita. Primeira imagem: medições de OD sobre imagem de satélite. Segunda imagem: células de 10 metros por 10 metros com o valor médio das medições realizadas em cada região. Terceira imagem: anomalias das medições de OD em relação à média da célula correspondente.



Durante a terceira campanha também foram realizadas medições estáticas para avaliar a evolução temporal do sensor. A evolução temporal destas medições estão representadas nas figuras 4, 5 e 6, sendo concentração de OD, temperatura da água e porcentagem de saturação de OD na água, respectivamente.

Observando o gráfico da evolução do OD, há uma variação ao longo do tempo, que pode indicar a estabilização do sensor. Porém, esta variação é de aproximadamente 0,05 mg/L durante um minuto de medição, que também pode ser atribuído a trocas gasosas com a atmosfera.

Figura 4 – Gráficos de medições de concentração de OD realizados na segunda campanha. Cada gráfico representa um ponto estático de medição e apresenta as medições de OD ao longo do tempo que o sensor ficou estático medindo.

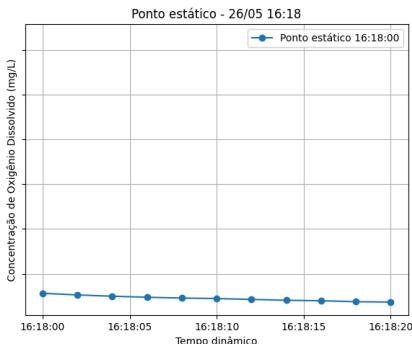
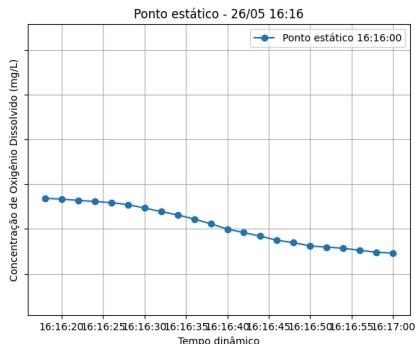
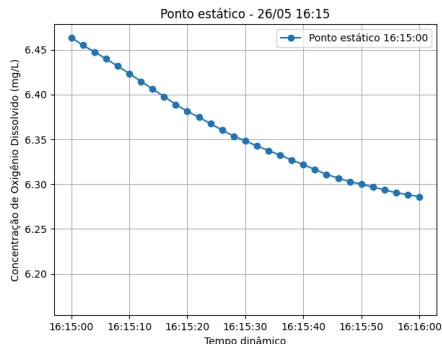


Figura 5 – Gráficos de medições de temperatura da água realizados na segunda campanha. Cada gráfico representa um ponto estático de medição e apresenta as medições de temperatura ao longo do tempo que o sensor ficou estático medindo.

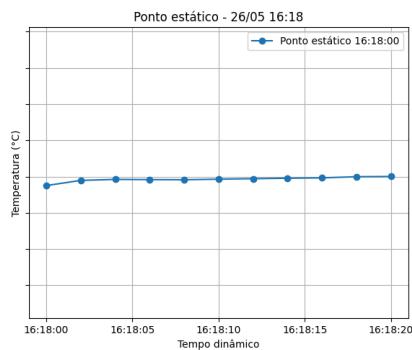
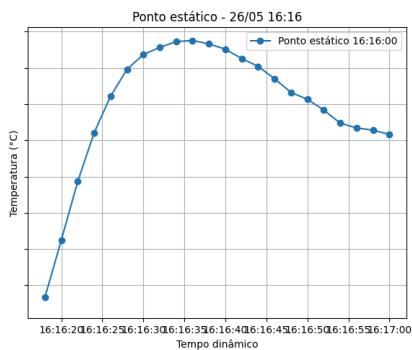
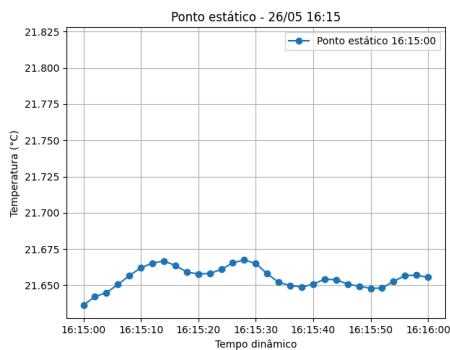
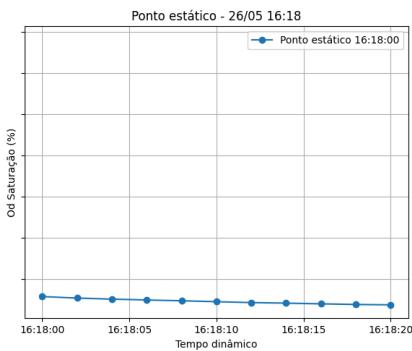
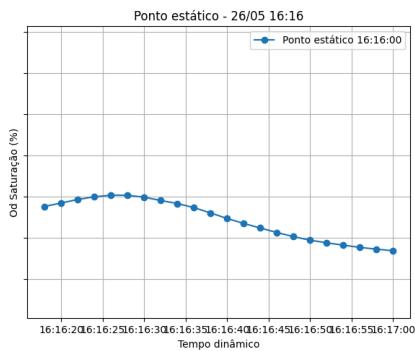
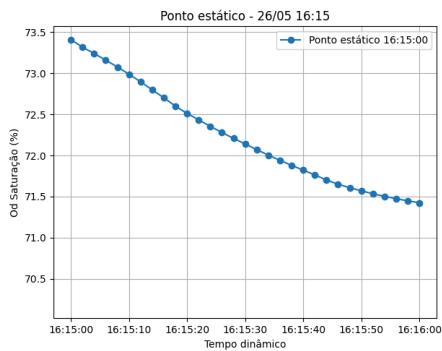


Figura 6 – Gráficos de medição de saturação de oxigênio na água realizados na segunda campanha. Cada gráfico representa um ponto estático de medição e apresenta as medições de saturação ao longo do tempo que o sensor ficou estático medindo.



Para avaliar as evoluções da saturação de OD na água (Figura 6), é necessário avaliar simultaneamente as evoluções de OD (Figura 4) e temperatura da água (Figura 5), devido a relação direta entre as variáveis, explicadas na Equação 1. Observa-se que os comportamentos da concentração de OD e da saturação de OD são similares; a variação da saturação pode ser explicada apenas pela variação da concentração de OD na água. As variações de temperatura ao longo do tempo são muito pequenas, em torno de 0,2 °C, então não interferem significativamente na saturação.

A terceira campanha de medição, realizada no Rio Atibaia, possui resultados representados de maneira diferente. A vazão medida pelo equipamento ADCP foi de $9,72 \text{ m}^3/\text{s}$, enquanto a seção transversal medida pode ser verificada na Figura 7.

Os resultados das medições de qualidade da água estão apresentados na Figura 8, onde é possível observar os pontos onde foram realizadas as medições e a seção transversal ajustada através da regressão linear. No segundo gráfico, onde as medições de concentração de OD estão plotadas, é possível verificar que a concentração não varia ao longo da seção transversal, com apenas alguns valores extrapolam a clara tendência durante a medição.

Figura 7 – Gráfico da seção transversal de medição do Rio Atibaia, as velocidades medidas são representadas em cores de acordo com a legenda.

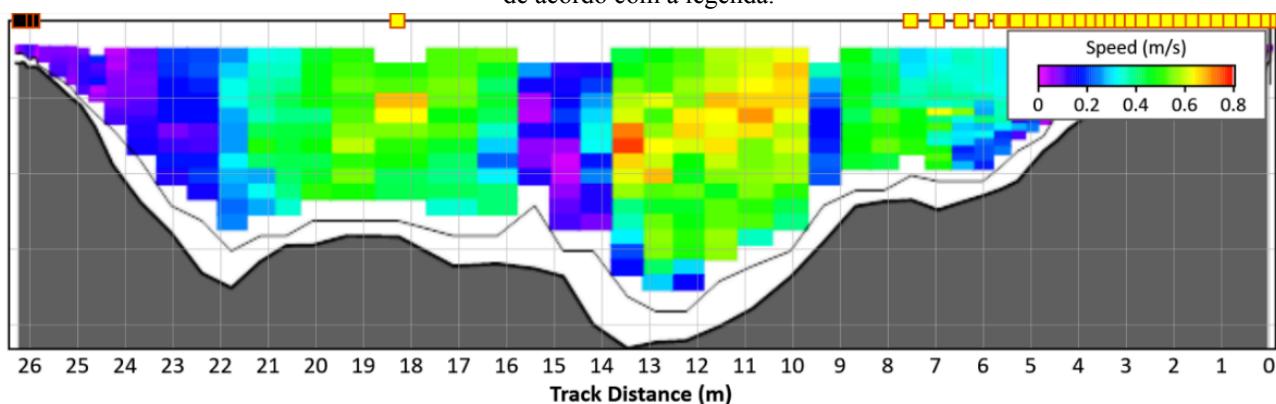
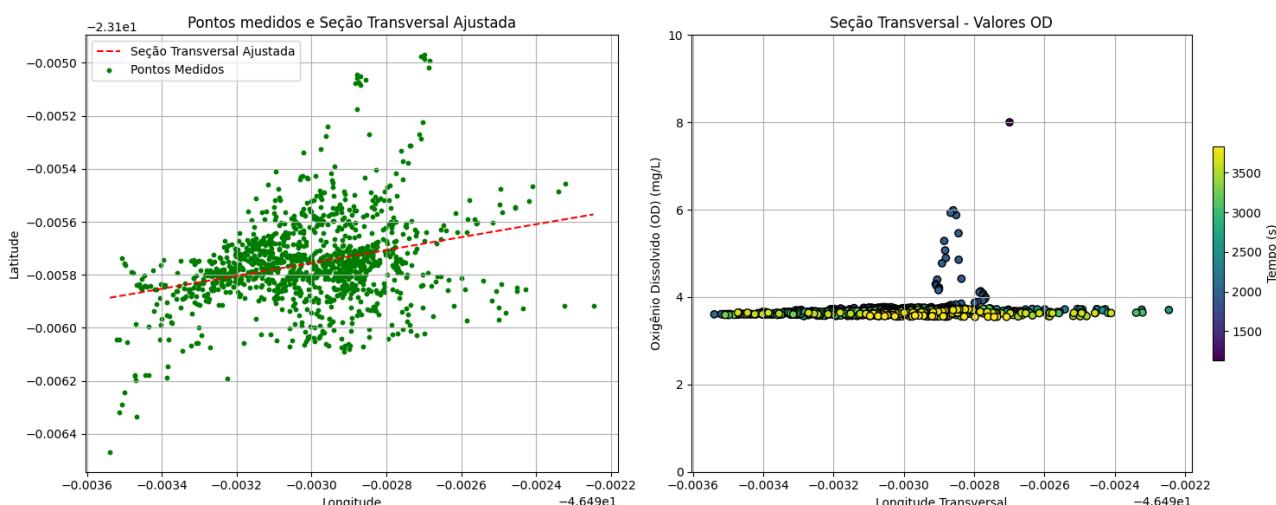


Figura 8 – Gráficos de medição de concentração de OD realizadas na terceira campanha. O gráfico da esquerda representa todos os pontos medidos e a seção transversal ajustada. O gráfico da direita mostra as medições de OD projetadas na seção transversal ajustada com os tempos de medição em relação ao início.



CONCLUSÃO

A construção do veículo controlado remotamente para realizar as medições simultâneas de vazão e qualidade da água foi satisfatória. O equipamento segura adequadamente o ADCP e o sensor de concentração de OD na água, além dos aparelhos GNSS necessários para georeferenciar as medições.

Quanto às medições, não foram verificados, nas condições experimentadas, problemas quanto à utilização do sensor de qualidade da água em um veículo móvel, com medições de concentração de OD e anomalias indicando que não há uma diferença significativa ao transitar em movimento sobre uma região. Além disso, as medições em pontos estáticos não apresentou grandes diferenças ao longo do tempo nos três pontos medidos. Essas diferenças podem ser atribuídas à própria qualidade da água variando ao longo do tempo de medição, ou ao tempo de estabilização do sensor.

REFERÊNCIAS

- BROWN, J.; TUGGLE, C.; MACMAHAN, J.; et al. (2011). “The use of autonomous vehicles for spatially measuring mean velocity profiles in rivers and estuaries”. *Intelligent Service Robotics*, 4, pp. 233–244. <https://doi.org/10.1007/s11370-011-0095-6>
- DESPAX, A.; LE COZ, J.; MUELLER, D. S.; HAUET, A.; CALMEL, B.; PIERREFEU, G.; et al. (2023). “Validation of an uncertainty propagation method for moving-boat acoustic Doppler current profiler discharge measurements”. *Water Resources Research*, 59, e2021WR031878.
- HUANG, H. (2018). Estimating uncertainty of streamflow measurements with moving-boat acoustic Doppler current profilers. *Hydrological Sciences Journal*, 63(3), 353–368.
- LE COZ, J.; PIERREFEU, G.; PAQUIER, A. (2008). “Evaluation of river discharges monitored by a fixed side-looking Doppler profiler”. *Water Resources Research*, 44, W00D09. <https://doi.org/10.1029/2008WR006967>
- LEBEL, T.; TAUPIN, J.D.; D'AMATO, N. (1997). “*Rainfall monitoring during HAPEZ-Sahel. I. General rainfall conditions and climatology*”. *Journal of Hydrology* 188-189(1-4), pp. 74 – 95.
- REGINA, B. A.; HONÓRIO, L. M.; PANCOTI, A. A. N.; SILVA, M. F.; SANTOS, M. F.; LOPES, V. M. L.; NETO, A. F. S.; WESTIN, L. G. F. (2021). “Hull and Aerial Holonomic Propulsion System Design for Optimal Underwater Sensor Positioning in Autonomous Surface Vessels”. *Sensors*, 21(2), pp. 571. <https://doi.org/10.3390/s21020571>
- SINGH, S.; NOUR, M. (2024). “IoT-Enabled Water Pollution Monitoring Remote Controlled Boat with a Debris Collection system in Aquatic Environments”. 2024 IEEE 22nd Student Conference on Research and Development (SCOReD), Selangor, Malaysia, pp. 716–721. <https://doi.org/10.1109/SCOReD64708.2024.10872740>
- SONTEK – A XYLEM BRAND. (2020). “River Surveyor RS5 – Declarations of Conformity”. San Diego, CA: SonTek. Documento técnico assinado por E.J. Rollo, Compliance Engineer, 3 de fevereiro de 2020.

SOTELO-TORRES, F.; ALVAREZ, L. V.; ROBERTS, R. C. (2023). "An Unmanned Surface Vehicle (USV): Development of an Autonomous Boat with a Sensor Integration System for Bathymetric Surveys". *Sensors*, 23(9), pp. 4420. <https://doi.org/10.3390/s23094420>.

ZHOU, Z.; RIIS-KLINKVORT, L.; AHRN KIEL JØRGENSEN, E.; et al. (2025). "UAS hydrometry: contactless river water level, bathymetry, and flow velocity – the Rönne river dataset". *Scientific Data*, 12, pp. 294. <https://doi.org/10.1038/s41597-025-04611-x>

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Sistema de Tecnologia e Monitoramento Ambiental do Paraná (SIMEPAR) pelo apoio e agradecem os Comitês PCJ e a Agência das Bacias PCJ pela oportunidade de realização deste estudo.