

ANÁLISE DA DEMANDA BENTÔNICA DE OXIGÊNIO DISSOLVIDO EM RIO URBANO: Estudo de caso do Rio Uberabinha, bacia hidrográfica do Rio Araguari, Triângulo Mineiro

OXYGEN DISSOLVED BENTONIC DEMAND IN URBAN RIVER: A case study for the Uberabinha River, Araguari river watershed, Triangulo Mineiro

Felipe Folgosi Biella¹, Bruno de Oliveira Lázaro², Marcio Ricardo Salla³

- 1 – Graduando em Engenharia Ambiental e Sanitária. Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia. felipefbiella@gmail.com
- 2 – Técnico de Laboratório. Mestre em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia. bruno.lazaro@ufu.br
- 3 – Professor Doutor. Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia. marcio.salla@ufu.br

Resumo: O conhecimento dos efeitos de cargas poluentes sobre um corpo hídrico receptor é subsídio para tomada de decisão dos gestores, com vistas ao uso sustentável das águas superficiais. As alterações quantitativas e qualitativas da água trazem impactos nas relações entre fatores bióticos e abióticos em ecossistemas aquáticos, o que justifica a necessidade de estudos ambientais relacionados à capacidade de suporte de corpos receptores. O conhecimento da dinâmica de oxigênio dissolvido na massa líquida está inserido nesses estudos ambientais, o que evidencia a importância da quantificação da demanda de fundo de oxigênio dissolvido em curso de água urbano de médio porte em região de clima tropical. O Rio Uberabinha foi escolhido em função dos usos múltiplos da água no município de Uberlândia, Triângulo Mineiro, principalmente em seu médio e baixo curso, incluindo abastecimento de água, recepção do esgoto sanitário tratado, irrigação para fins diversos e represamento para fins hidrelétricos. A metodologia experimental para mensuração do consumo de oxigênio dissolvido se baseou em técnica respirométrica consagrada na literatura, enquanto a montagem do aparato experimental seguiu as recomendações de Truax *et al.* (1995). Foram realizadas seis amostragens de fundo em um único ponto do rio, a jusante da área urbana de Uberlândia, englobando o período chuvoso e transição entre o período chuvoso e seco. A granulometria do sedimento foi obtida por meio de peneiramento, conforme NBR 7181 (ABNT, 2018). A concentração de oxigênio dissolvido foi medida por meio de uma sonda, conforme NBR 11958 (ABNT, 2015). Os resultados obtidos demonstraram que, para os sedimentos predominantemente arenosos, as maiores taxas de decaimento tendem a ocorrer no ciclo das primeiras 10 horas de análise, intervalo de tempo este com maior intensidade das reações de oxidação da matéria orgânica.

Palavras-chave: Demanda bentônica. Oxigênio dissolvido. Limnologia. Qualidade da água.

Abstract: This work aimed to analyze the benthic Oxygen demand of the bottom sediments of urban rivers in a tropical climate. For that, a case study was developed in the Uberabinha River, an important watercourse that cuts through the city of Uberlândia/MG, Brazil. The analysis methodology of this research was based on the literature recommendations for the application of the respirometric technique for measuring and modeling the DBOS. In this sense, five anaerobic reactors were built and fed with bottom sediment and water samples from the Uberabinha River, all collected at a fixed georeferenced point of the watercourse and at different times, with the aim of characterizing the BOD in the period flood and drought. The sediment was characterized according to its granulometry according to ABNT NBR 7181/2018. The concentrations of Dissolved Oxygen (DO) in the reactors were measured, at regular intervals of time, using a measuring probe in accordance with the norms of ABNT NBR

11958/2015. These data were organized in the form of an electronic spreadsheet through which it was possible to determine the DO decay rates in the water and in the bottom sediment. The obtained results demonstrated that the sediments are predominantly sandy. In addition, it was noticed that the highest decay rates tend to occur in the cycle of the first 10 hours of analysis, a time interval with the highest intensity of oxidation reactions of organic matter. Finally, it was noticed that the DBOS tends to be higher in the flood periods when compared to the dry periods.

Key words: Benthic demand. Limnology. Water quality.

1 INTRODUÇÃO

A qualidade da água é um fator fundamental para a manutenção da vida nos ecossistemas aquáticos e para a saúde pública. Assim, rios poluídos podem comprometer a disponibilidade de água para o consumo humano e para atividades econômicas, além de afetar a fauna e a flora aquática e terrestre.

O estudo da demanda bentônica de oxigênio dissolvido (S_d) em corpos de água urbanos é uma parcela importante da avaliação da dinâmica de oxigênio dissolvido em curso de água; o oxigênio dissolvido é o principal parâmetro na avaliação do impacto da atividade humana sobre os ecossistemas aquáticos. Esteves (1998), Von Sperling (2005) e Truax *et al.* (1995) destacam a importância da análise de S_d em rios urbanos, uma vez que esses ecossistemas estão sujeitos a diversas pressões antrópicas. Essas pressões podem ser exemplificadas como o lançamento de efluentes sanitários, o desmatamento das áreas de preservação permanentes e o uso intensivo do solo circunjacente, resultando na eutrofização dos rios, na perda da biodiversidade, no assoreamento de cursos de água e, conseqüentemente, na diminuição de qualidade da água.

O estudo ambiental de capacidade suporte de um curso de água deve considerar os valores dos termos cinéticos físicos, químicos e bioquímicos condizentes com as características climatológicas e de qualidade da água locais. A maioria dos estudos sobre S_d em ambiente lótico tem sido realizada em ecossistemas aquáticos de climas temperados, havendo assim uma lacuna de pesquisas em climas tropicais. Esta lacuna ocorre principalmente pelas diferenças na salinidade e temperatura da água (VON SPERLING, 2007). Com base nessa problemática, este estudo teve como objetivo analisar a S_d em um curso de água de porte médio, a jusante da área urbana em região de clima tropical.

O Rio Uberabinha foi escolhido em função dos usos múltiplos da água no município de Uberlândia, Triângulo Mineiro, principalmente em seu médio e baixo curso, incluindo abastecimento de água, recepção do esgoto sanitário tratado, irrigação para fins diversos e represamento para fins hidrelétricos. Os resultados decorrentes deste estudo serão utilizados em pesquisas futuras desenvolvidas pelo grupo de pesquisa em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da UFU, além do que poderão ser utilizados por profissionais da área ambiental em consultorias relacionadas à capacidade de suporte de corpos hídricos receptores.

2 DEMANDA DE FUNDO DE OD

O despejo de efluentes sanitários de maneira inapropriada em corpos hídricos se configura como o principal mecanismo de contaminação e conseqüente redução da qualidade da água (VON SPERLING, 2007; RIGAUD *et al.*, 2021). O esgoto doméstico, descartado ainda em sua forma bruta, possui elevado teor de material orgânico biodegradável, cuja estabilização pelos mecanismos naturais de autodepuração implica em um grande consumo de OD. Este elevado consumo compromete a dinâmica dos ecossistemas aquáticos e prejudica seriamente as populações que se valem deste recurso (VON SPERLING, 2007; ROVELLI *et al.*, 2021).

Por possuir uma massa específica predominantemente maior que a massa específica da água, a matéria orgânica suspensa de efluentes sanitários brutos ou sem o devido tratamento tende a se sedimentar na região do fundo dos corpos hídricos lânticos ou lóticos. Com o passar do tempo, esses sedimentos, em conjunto com a fauna e a flora bentônica, incrementam o consumo de OD por meio dos processos de respiração e de oxidação da matéria orgânica (ATTARD *et al.*, 2019). De uma forma geral, os mecanismos de atuação da S_d ocorrem por diversos fatores, a saber: introdução de DBO na massa líquida pelo revolvimento dos depósitos; consumo de oxigênio por produtos solúveis da decomposição bentônica que se difundem na água sobrenadante; consumo de oxigênio pelos gases produzidos pela decomposição anaeróbia (*air stripping* ou arraste de gases); demanda de oxigênio pelo próprio lodo (camada superficial aeróbia).

Em algumas situações, a S_d aumenta a ponto de promover uma zona anaeróbia nos assoalhos hídricos. Esta zona é responsável por diminuir significativamente a qualidade da água, pois possibilita a proliferação de bactérias anaeróbias causadoras de mau cheiro e doenças, altera parâmetros físicos e químicos da água e, em condições extremas, pode causar a morte da fauna bentônica por hipóxia (RIGAUD *et al.*, 2021).

Diante desta problemática, a comunidade científica tem incentivado o desenvolvimento de pesquisas que objetivam medir a S_d , seja em escala de laboratório ou real; alguns pesquisadores propõem utilizar a S_d como indicativo de poluição hídrica. Neste contexto, destacam-se os estudos de Traux *et al.* (1995), Ling *et al.* (2009) e Fulweiler *et al.* (2010), nos quais a S_d em estuários com alta influência antrópica foi medida em campo por meio de técnica respirométrica. Os autores demonstraram que a S_d é preponderantemente maior nos meses chuvosos, em comparação aos meses de estiagem, além do que tende a aumentar à medida que se percorre o curso hídrico da região não remansada para a região remansada, em função de diversos fatores, tais como: maior entrada de matéria orgânica associada aos deflúvios superficiais; aumento da atividade decompositora devido ao aumento da matéria orgânica na massa líquida; aumento da vazão e diluição do OD ao longo dessa massa, proporcionando uma distribuição mais uniforme do OD; o aumento de temperatura nas estações mais quentes, com conseqüente maior incidência solar, acelera a atividade biológica e a taxa de decomposição mais rápida da matéria orgânica.

Além disso, ressalta-se a maior entrada de MO, decorrente do transporte de detritos vegetais, nutrientes e poluentes pela escorrência superficial. Esse influxo intensificado de MO resulta em uma ampliação da atividade decompositora, já que a presença abundante de MO na massa líquida propicia um aumento proporcional na taxa de decomposição. Adicionalmente, o aumento do fluxo líquido (vazão) durante o período chuvoso contribui para a mistura da água, causando a maior diluição do nível de OD ao longo da massa líquida, ocasionando uma distribuição mais homogênea do OD (ATTARD *et al.*, 2019).

Por fim, outro fator de relevância é o incremento de temperatura, resultante das estações mais quentes e da maior incidência solar. Essa elevação térmica desencadeia uma aceleração da atividade biológica, uma vez que as temperaturas mais altas promovem um ambiente propício para o aumento da taxa de decomposição da MO. Em conseqüência, a demanda de oxigênio é potencializada, refletindo na magnitude da sediment demand (S_d) (VON SPERLING, 2007).

Já Yee *et al.* (2011), Partor *et al.* (2011), Provost *et al.* (2013), Mehring *et al.* (2014) e Toussaint *et al.* (2014) realizaram medições espaço-temporais de S_d em ambientes aquáticos lóticos. Em geral, os estudos convergiram no entendimento de que parâmetros como o clima e a composição granulométrica, química e biológica dos sedimentos de fundo são circunstanciais na mensuração da demanda bentônica e a influenciam de modo significativo.

Chen *et al.* (2022) avaliaram a influência espacial dos sedimentos de fundo na S_d . Os autores comprovaram que o consumo de oxigênio dissolvido pela biota bentônica cresce à

medida que se distancia da margem do corpo de água; o acúmulo de matéria orgânica biodegradável nas regiões mais profundas colabora com o aumento da S_d e da possibilidade de formação de zonas anaeróbias no fundo desses ambientes.

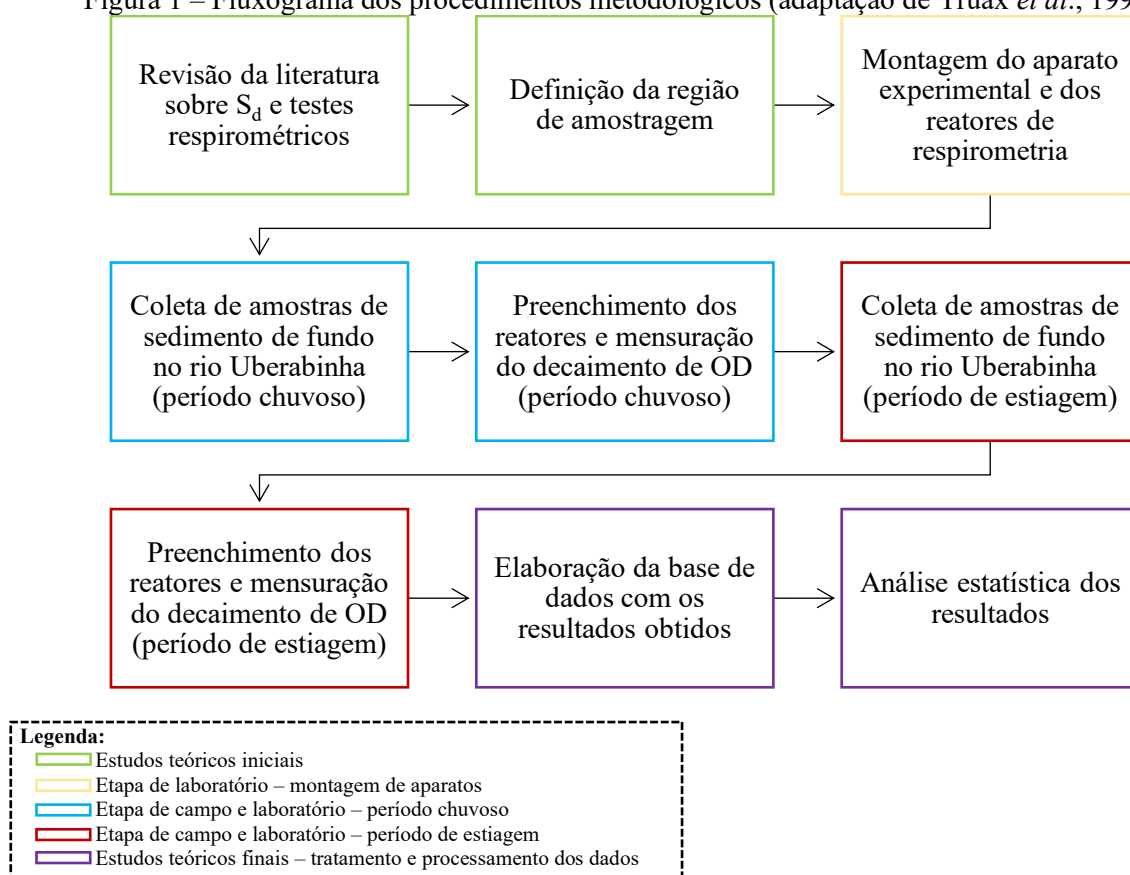
Em termos metodológicos, Wallace *et al.* (2016), Willson e Depaul (2017) e Garrison *et al.* (2021) trazem metodologias experimentais e numéricas para a estimativa de S_d . Em termos gerais, os autores utilizam metodologia experimental similar ao presente estudo, por meio de técnica respirométrica, reatores laboratoriais e sonda medidora de OD.

Apesar da crescente notoriedade internacional, a maioria das pesquisas cujo tema principal é a modelagem da S_d tem sido desenvolvida em regiões de clima temperado. Desta maneira, tornam-se necessários estudos em corpos hídricos característicos de outras tipologias morfoclimáticas. A comparação de valores de S_d em regiões de climas distintos permite analisar a eficiência das metodologias descritas na literatura para condições climáticas distintas, bem como otimizá-las para melhor atender as particularidades de cada região.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Conforme exposto anteriormente, a pesquisa objetivou analisar a S_d em rio urbano de médio porte. O estudo se baseou na metodologia utilizada por Truax *et al.* (1995), para os testes respirométricos em ambiente controlado de laboratório. A Figura 1 ilustra, por meio de um fluxograma, os procedimentos metodológicos desenvolvidos.

Figura 1 – Fluxograma dos procedimentos metodológicos (adaptação de Truax *et al.*, 1995).



3.1 Área de estudo

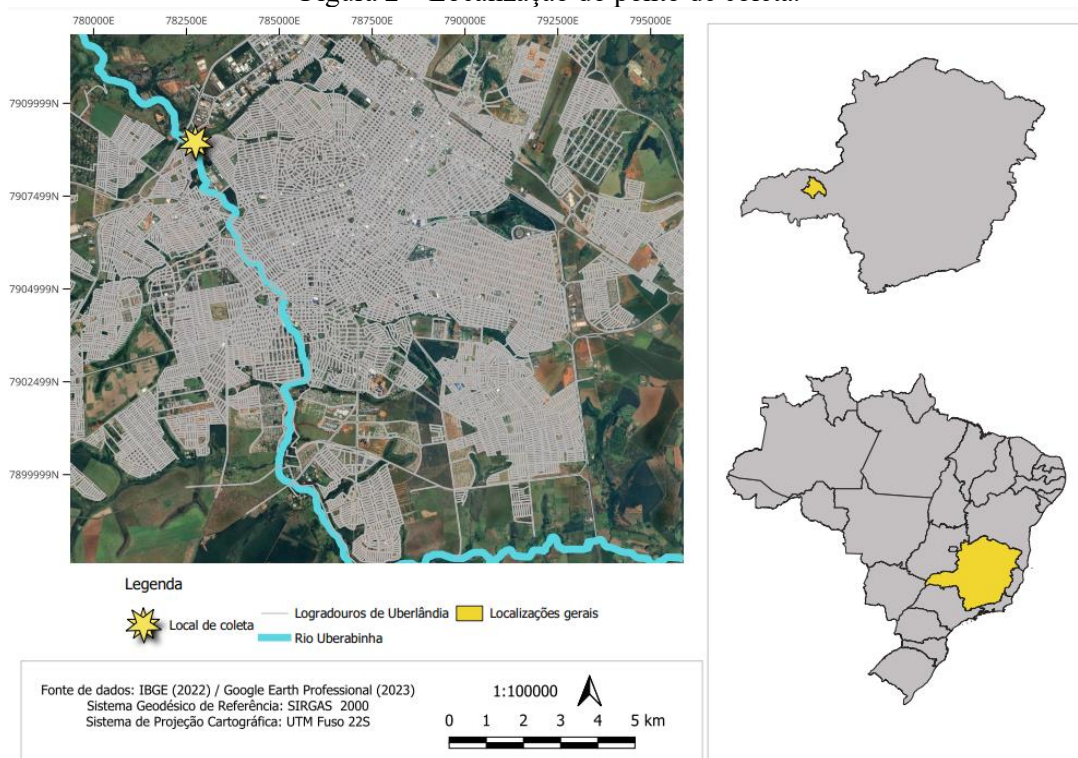
O Rio Uberabinha é um curso de água de médio porte, pertencente à Bacia Sedimentar do Rio Paraná, localizado na Mesorregião Geográfica do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba e

que corta a cidade de Uberlândia, Triângulo Mineiro. Em suas circunjacências, o Rio Uberabinha apresenta tanto áreas de preservação permanente e parques lineares quanto regiões onde o uso e ocupação do solo para atividades residenciais, comerciais e industriais é bastante acentuada.

Com base na classificação de Köppen-Geiger (1936) apud Flauzino (2014), adotada universalmente e adaptada ao Brasil, o clima regional da sub-bacia do Rio Uberabinha se caracteriza pelo regime tropical, com período de seca entre os meses de abril e setembro e de chuva entre os meses de outubro e março. A precipitação anual está em torno de 1.350 mm. O predomínio da massa de ar Equatorial Continental, entre os meses de novembro a abril, é responsável pelas chuvas abundantes que representam cerca de 40% da pluviosidade média anual, concentrada nos meses de dezembro a janeiro. Entre maio e outubro, prevalecem as massas de ar Tropical Atlântica e Continental, que se distinguem por tempo bom, com baixa nebulosidade, ocasionando escassez de chuva. Ainda de acordo com os mesmos autores, as temperaturas médias dos meses mais frios e mais quentes do ano de 2015, variaram em torno de 20°C em maio e julho, e 24°C em setembro e novembro. Os ventos apresentam uma velocidade média entre 2 e 3 m/s, provenientes principalmente do Leste.

As amostragens ocorreram em um único ponto no rio Uberabinha, a jusante da área urbana, nas imediações do bairro Distrito Industrial (ver Figura 2). Os principais motivos para a escolha do ponto de amostragem foram: facilidade e segurança no acesso à margem do curso de água, que permitiu rápido início dos experimentos em laboratório; acúmulo acentuado de sedimentos de fundo devido à morfologia do rio; região a jusante da área urbana permite detectar as ocorrências de ligações clandestinas nos sistemas de esgotamento sanitário e drenagem pluvial e eventuais lançamentos de esgoto industrial não tratado no curso de água.

Figura 2 – Localização do ponto de coleta.



Fonte: Os autores (2023).

O local escolhido para a amostragem, localizado nas coordenadas 18°53'31,92"S e 48°18'57,22"O, possui as margens limpas e com reduzida declividade de talude, o que facilita as coletas de sedimento de fundo (Figura 3).

Figura 3 – Local de amostragem no Rio Uberabinha, Uberlândia, Triângulo Mineiro



Fonte: Os autores (2023).

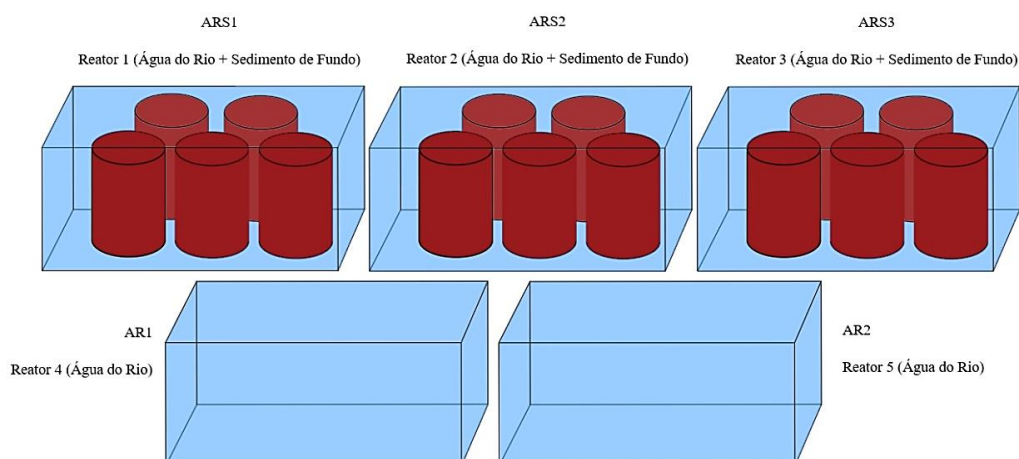
Nesta região de amostragem é possível visualizar o lançamento clandestino de efluentes domésticos e industriais, o que colabora com o incremento de matéria orgânica biodegradável junto à camada bentônica. Logo a jusante do ponto de amostragem, a aproximadamente 2,3 km, ocorre o lançamento de esgoto sanitário tratado da ETE Uberabinha, cuja carga poluidora lançada no corpo receptor altera significativamente as características física, química e biológica da água. Futuros estudos do grupo de pesquisa em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da UFU focarão em regiões a jusante da confluência do esgoto tratado com o rio Uberabinha; regiões estas que certamente apresentam valores elevados de S_d .

3.2 Montagem do aparato experimental

Para a realização dos testes de respirometria, com consequente determinação da S_d , foi montado um aparato experimental nas dependências do Laboratório de Mecânica dos Fluidos, Hidráulica e Hidrologia (LABHID) da Faculdade de Engenharia Civil (FECIV) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

De acordo com a Figura 4, o aparato experimental é constituído por 5 reatores de formato prismático retangular (caixas plásticas transparentes com tampa), com volume interno máximo de 6 litros; os reatores 1, 2 e 3, identificados como ARS1, ARS2 e ARS3 na Figura 4, são preenchidos por água do Rio Uberabinha (AR) e por cinco “copos” cilíndricos por reator; os “copos” são formados por 100 mm de tubulação de material Policloreto de Vinila (PVC) e diâmetro 75 mm e por cap na base, preenchidos por sedimento de fundo do Rio Uberabinha (S); os reatores 4 e 5, identificados como AR1 e AR2 na Figura 4, são preenchidos somente por água do Rio Uberabinha (AR).

Figura 4 – Reatores confeccionados para o teste respirométrico.



Fonte: Os autores (2023).

A configuração experimental dos reatores em triplicata ARS1, ARS2 e ARS3 permitiu quantificar o consumo de oxigênio dissolvido para a degradação da matéria orgânica biodegradável dissolvida presente na porção sobrenadante e na interface entre o sedimento de fundo e a porção sobrenadante. Já a configuração experimental dos reatores em duplicata AR1 e AR2 permitiu quantificar apenas o consumo de oxigênio dissolvido para a degradação da matéria orgânica biodegradável dissolvida presente na porção sobrenadante.

3.3 Amostragens

As amostragens da porção sobrenadante e de sedimento de fundo do Rio Uberabinha se deram em épocas distintas, de modo a contemplar o final do período chuvoso e início da transição entre o período chuvoso e de estiagem. As amostragens foram realizadas em 12, 19 e 26 de abril de 2023, 03 e 10 de maio de 2023 e 14 de junho de 2023.

As coletas de água do rio ocorreram por meio de submersão de dois galões plásticos com capacidades de 10 e 20 litros. As coletas de sedimento de fundo ocorreram por meio de amostrador tipo Kajac (core), marca Limnotec; o amostrador tipo Kajac permitiu a coleta de camada de sedimento de fundo próxima a 15 cm preservada; essa camada de sedimento de fundo preservada era cuidadosamente colocada nos “copos” de PVC. As Figuras 5a e 5b ilustram, respectivamente, os “copos” com e sem sedimento de fundo.

Figura 5 - “copos”: (a) sem sedimento de fundo; (b) com sedimento de fundo.



(a)



(b)

Fonte: Os autores (2023).

Na amostragem de 12 de abril de 2023, além das coletas de água do rio e de sedimento de fundo, também foi coletado aproximadamente 5 kg de sedimento de fundo para a caracterização granulométrica, seguindo a metodologia descrita na NBR 7181 (ABNT, 2018).

3.4 Configuração experimental

Em cada campanha de campo, a água de rio e sedimentos de fundo coletados e já dispostos nos “copos” foram rapidamente transportados ao Laboratório de Mecânica dos Fluidos, Hidráulica e Hidrologia (LABHID) para o início do experimento.

Em um primeiro momento, os reatores ARS1, ARS2 e ARS3 foram preenchidos com os cinco “copos” preenchidos com os sedimentos de fundo; na sequência, os mesmos reatores ARS1, ARS2 e ARS3 foram complementados pela água do rio, evitando ao máximo deformar a interface entre os sedimentos e a massa líquida; os reatores AR1 e AR2 foram completamente preenchidos pela água do rio, volume próximo a 6 litros, evitando ao máximo turbulência no escoamento a fim de manter a concentração inicial de OD; para finalizar, os reatores foram vedados com plástico filme a fim de evitar a troca gasosa com o ambiente externo. A Figura 6 ilustra os reatores.

Figura 6 – Reatores de respirometria.



Fonte: Os autores (2023).

Após a preparação dos reatores, o consumo de OD foi mensurado por meio da sonda medidora de OD, respeitando a metodologia descrita na NBR 11958 (ABNT, 2015); foi utilizada uma sonda de OD marca HANNA HI-9146/10. As medições ocorreram nos tempos de contato 0h, 2h, 4h, 6h, 8h, 10h, 20h e 22h após a preparação dos cinco reatores. Em cada medição, cuidadosamente o plástico filme foi retirado para a introdução da sonda; a agitação suave da sonda permitia a estabilização de OD.

3.5 Estimativa de S_a

Primeiramente foi calculada a variação da concentração de OD ao longo do tempo em cada um dos cinco reatores. Nos reatores AR1 e AR2, a variação de OD é ocasionada somente pela matéria orgânica biodegradável solúvel na massa líquida. Já nos reatores ARS1, ARS2 e ARS3, a variação de OD é ocasionada pela sinergia da matéria orgânica dissolvida na massa

líquida e, principalmente, pela matéria orgânica dissolvida presente nos poros dos sedimentos e suspensa adsorvida ao sedimento de fundo.

Com isso, a variação da concentração de OD ao longo do tempo ocasionada somente pelos sedimentos de fundo do rio foi estimada pela diferença entre os valores médios obtidos nos reatores AR1 e AR2 e nos reatores ARS1, ARS2 e ARS3. A consistência da variação da concentração de OD ao longo do tempo foi avaliada estatisticamente pela análise de variância (ANOVA), por meio do *software* PAST 4.10.

A partir daí, para cada uma das seis amostragens, S_d ao longo do tempo foi estimativa a partir da equação 1, seguindo Traux *et al.* (1995), Yee *et al.* (2011) e Garrison *et al.* (2021).

$$S_{di} = \{[(C_{i-1} - C_i) \cdot Vol_{líquido}] / (t_i - t_{i-1}) / 24\} / A \quad (1)$$

Na qual: S_{di} é a demanda de fundo de OD no instante i (g/m².dia); C_i é a concentração de OD no instante i (mg/L); C_{i-1} é a concentração de OD no instante i-1 (mg/L); Vol_{líquido} é o volume líquido em cada reator (m³); t_i é o tempo de experimento no instante i (h); t_{i-1} é o tempo de experimento no instante i-1 (h); A é a área interfacial entre o sedimento e o meio líquido (m²).

A área interfacial A dos cinco “copos” é igual a 0,022078125 m² (5*(pi()*0,075²)/4 m²); Vol_{líquido} em cada um dos reatores, desconsiderando os “copos”, é igual a 0,003792188 m³ (volume interno do reator subtraído do volume dos 5 “copos”, ou seja, 0,006 m³ – 0,1*0,022078125 m³, onde 0,1 m é a altura dos “copos”).

3.6 Caracterização do sedimento de fundo

Além da mensuração do OD, os sedimentos de fundo do leito do Rio Uberabinha foram caracterizados pela granulometria; foi seguida a recomendação metodológica prescrita na NBR 7181 (ABNT, 2018) para a curva granulométrica dos sedimentos.

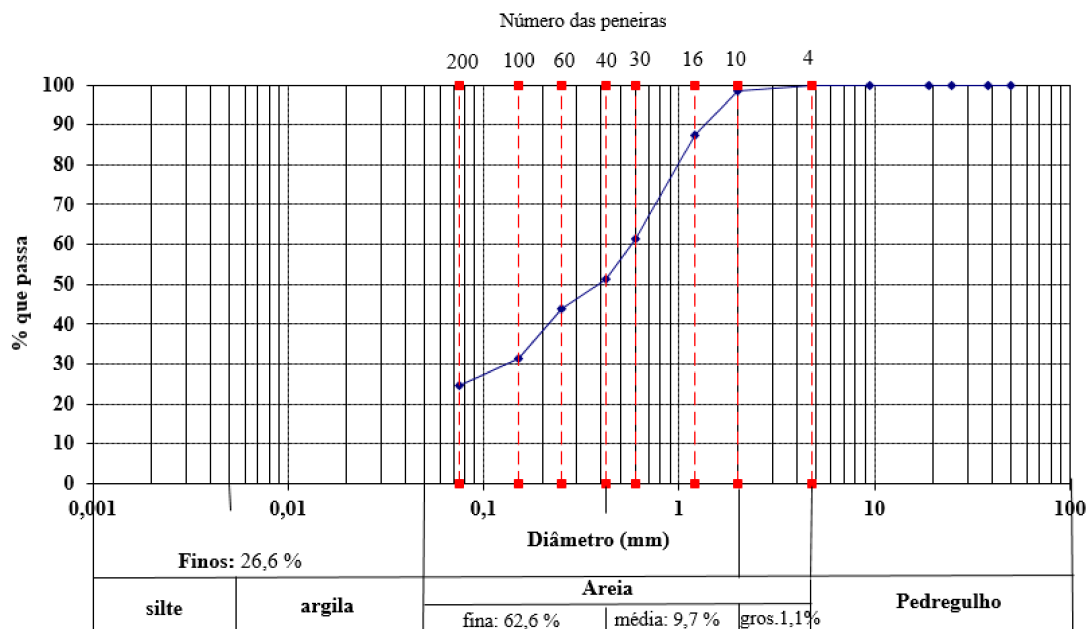
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização do sedimento de fundo

Houve a caracterização dos sedimentos de fundo apenas para a amostragem 1 em 12 de abril de 2023, justificada pela proximidade entre as amostragens. O sedimento de fundo encontrado na área de estudo apresentou uma predominância de partículas com diâmetro entre 0,42 mm e 0,075 mm (Figura 7).

Neste sentido, com base na NBR 7181 (ABNT, 2018), este sedimento foi classificado como sendo uma areia fina mal graduada. Observa-se pela Figura 7 que 73,40% do material de fundo foi classificado como areia em suas diversas subclasses e 26,6% como silte e argila. Torna-se importante salientar que esta classificação é consonante com a realidade da maioria dos leitos hídricos tropicais, especialmente no que diz respeito aos cursos de água existentes no bioma do Cerrado brasileiro (VON SPERLING, 2007).

Figura 7 – Curva granulométrica para classificação do sedimento de fundo.



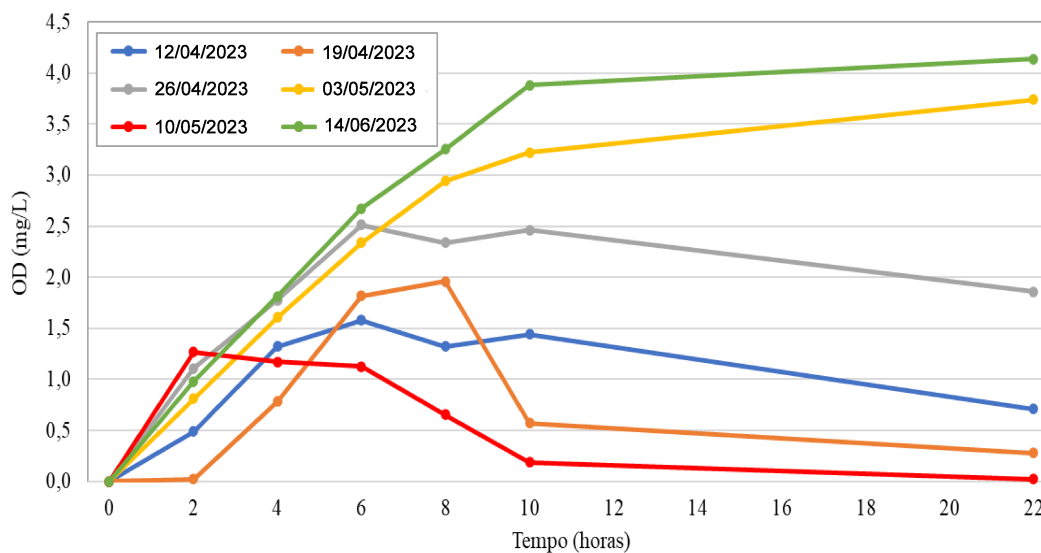
Fonte: Os autores (2023).

O sedimento de fundo nestes corpos hídricos tende a ser originário de solos predominantemente lateríticos e arenosos. Estas partículas de areia possuem a tendência de serem transportadas pelo escoamento e se depositar no fundo do rio, criando condições para o desenvolvimento de um ecossistema bentônico característico (CHEN *et al.*, 2022).

4.2 Valores de Sd

De acordo com a metodologia, a variação da concentração de OD ao longo do tempo ocasionada somente pelos sedimentos de fundo do rio foi estimada pela diferença entre os valores médios obtidos nos reatores AR1 e AR2 e nos reatores ARS1, ARS2 e ARS3, cujos resultados estão ilustrados na Figura 8.

Figura 8 - Variação da concentração de OD ao longo do tempo.



Fonte: Os autores (2023).

A variação de OD tem uma tendência crescente até 6 horas para a maioria das amostragens. Entre 6h e 10 h não existe uma tendência de variação definida. A partir de 10 h a tendência é de manutenção de OD. Nas primeiras horas de experimentos, a elevada quantidade de matéria orgânica biodegradável no sedimento de fundo ocasiona uma elevada cinética de oxidação da matéria orgânica. A partir daí, a matéria orgânica reduzida limita a cinética de oxidação a valores próximos a zero.

As amostragens 4 e 6 mantiveram um comportamento crescente até a última mensuração de OD no decorrer da 22ª hora. Isso pode significar um maior índice de MO presente no sedimento, bem como níveis maiores de nitrogênio amoniacal. Esses maiores índices caracterizariam uma demanda de segundo estágio, uma vez que as bactérias autótrofas nitrificantes tendem a demorar mais para se reproduzirem do que as bactérias heterótrofas, que constituem a demanda carbonácea (VON SPERLING, 2007; ATTARD *et al.*, 2019).

A Tabela 1 traz os resultados da análise estatística de variância (ANOVA). Percebe-se que as variações de OD ao longo do tempo obtiveram um valor-P igual a 0,005836. Isto significa que os resultados obtidos possuem uma significância estatística de 99,4146%, o que permitiu afirmar que o comportamento de variação de OD não é aleatório (DRUCK *et al.*, 2004).

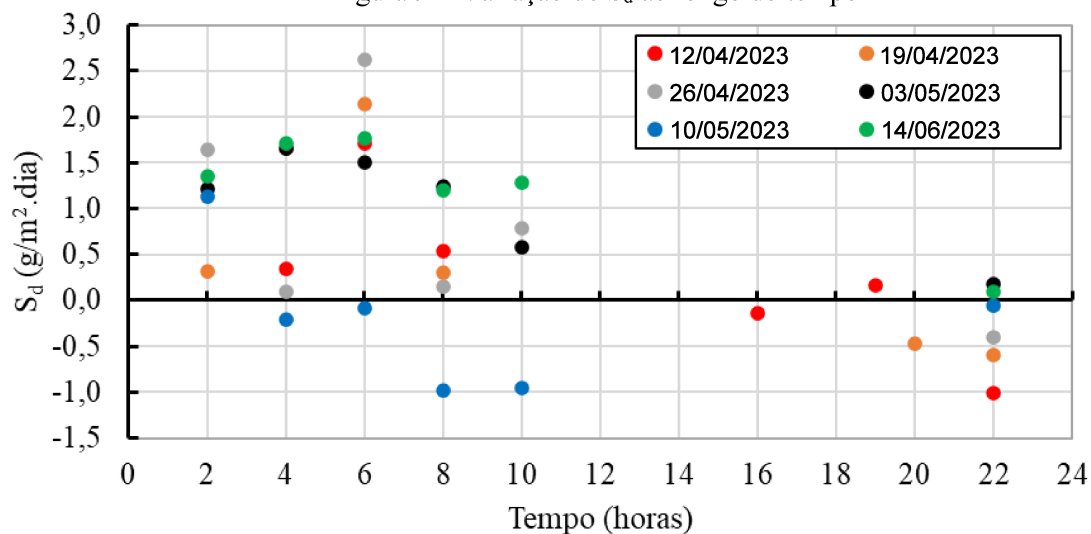
Tabela 1 – Análise de variância.

Fonte da variação	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	valor-P	<i>F crítico</i>
Entre grupos	19,05633	5	3,811265	3,954293	0,005836	2,477169
Dentro dos grupos	34,69787	36	0,96383			
Total	53,7542	41				

Fonte: Os autores (2023).

A S_d para cada intervalo de tempo experimental é expressa em $g/m^2 \cdot dia$, interpretada como a massa de OD consumida por área interfacial entre o fundo do rio e a camada sobrenadante por dia. A Figura 9 traz a variação de S_d ao longo do tempo para cada uma das seis amostragens.

Figura 9 – Variação de S_d ao longo do tempo



Fonte: Os autores (2023).

Os valores de S_d entre 0,10 e 2,63 $g/m^2 \cdot dia$, para as primeiras 10 h de experimento, indicam que, na área de estudo, existe a contaminação por agentes poluidores. Estes agentes podem ser exemplificados na forma de efluentes industriais e domésticos, bem como resíduos

sólidos que são despejados no curso de água e em suas adjacências. Os valores negativos de S_d em tempos superiores a 10h de experimento indicam uma quantidade reduzida de matéria orgânica biodegradável, associado à limitação da sonda medidora de OD. Acredita-se que a discrepância de S_d para a amostragem 5 esteja relacionada à qualidade da água do rio; todavia, a ausência da caracterização da água impediu a confirmação dessa tese.

Independente da carga poluente lançada no curso de água, os organismos bentônicos aeróbios consomem o OD presente na massa líquida (FULWEILER, NIXON e BUCKLEY; 2010). Todavia, torna-se importante destacar que o consumo de OD não é exclusivo da respiração da comunidade bentônica, mesmo que este processo seja um dos mais influentes no decaimento de OD. A literatura lista outros processos químicos e biológicos como intervenientes nesse decaimento, tais como as reações para estabilização da MO, a fixação de micronutrientes no fundo do leito do curso de água, dentre outros (LING *et al.*, 2009; WILSON e DEPAUL, 2017).

De acordo com a granulometria do sedimento de fundo, o predomínio por areia fina (62,6% dos sedimentos) e silte e argila (26,6% dos sedimentos) evidencia que a S_d é influenciada pelos materiais suspensos de fundo, especificamente nesta região do Rio Uberabinha. O tamanho do sedimento de fundo tem relação indireta com a capacidade de adsorção da matéria orgânica biodegradável; ou seja, quanto menor for a classificação dos sedimentos de fundo, maior é o acúmulo de matéria orgânica biodegradável.

Os valores de S_d obtidos neste estudo foram comparados com outros estudos encontrados na literatura. Fulweiler, Nixon e Buckley (2010), em Narragansett Bay, uma baía e estuário na região nordeste dos EUA, apesar de encontrarem fortes gradientes de produção primária, a S_d e o fluxo de nutrientes não apresentaram padrão espacial claro, porém identificaram uma predominância de valores maiores em zonas antropizadas. Ling *et al.* (2009), em ambientes específicos na Malásia Oriental, obtiveram S_d entre 0,76 e 21,4 g.O₂/m².dia em regiões próximas a depósitos de matéria orgânica, como fazendas de camarões e aquiculturas. Já Wilson e De Paul (2017), em grandes lagos em New Jersey, EUA, obtiveram S_d entre 1,5 e 8,4 gO₂/m².dia, diretamente relacionadas às dimensões do lago e suas características geográficas.

Além disso, quando observamos um valor de S_d entre 0,10 e 2,63 g/m².dia, encontrados no presente artigo e quando é levado em conta o clima tropical e ambiente possivelmente contaminado, notamos uma convergência com os resultados apresentados na literatura.

Esse intervalo de valores encontra paralelos na literatura em outros rios de climas ou condições antrópicas semelhantes, como nos estudos de Yee *et al* (2011) e Ling *et al* (2009) em clima tropical monçônico em locais próximos ao despejo de efluentes ricos em MO, nos estudos em climas temperados como o de Wilson e DePaul (2017) nos EUA, os estudos citados reforçam como as características geográficas, sazonais e antropogênicas desempenham um papel interligado na determinação das demandas bentônicas de oxigênio.

Os resultados em rios brasileiros e em regiões com ambientes potencialmente contaminados oferecem um contexto relevante para a compreensão das variações na demanda de oxigênio sedimentar, ressaltando a necessidade contínua de investigações para informar políticas de conservação e manejo sustentável das águas (VON SPERLING, 2007).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo auxiliará na compreensão das diversas dinâmicas ambientais e antrópicas que impactam nos ecossistemas terrestres e aquáticos. Algumas conclusões são apresentadas:

- É possível e estatisticamente confiável a aplicação de técnicas respirométricas para o estudo da demanda de fundo de OD de rios em ecossistemas tropicais. A aplicabilidade dessas

técnicas é extremamente importante para o crescimento do acervo de dados sobre ambientes lóticos e lênticos dos cursos d'água em todo o Brasil e demais países com clima tropical, de modo a fomentar estudos em limnologia, qualidade da água e autodepuração de rios;

- Os sedimentos de fundo do Rio Uberabinha, bem como o ecossistema bentônico da área de estudo, apresentam fortes indícios de contaminação por agentes poluidores. Estes agentes são os principais responsáveis por gerar o padrão comportamental da S_d mensurado nos reatores respirométricos desenvolvidos.

Seguem algumas sugestões para trabalhos futuros a serem desenvolvidos pelo grupo de pesquisa em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da UFU:

- Aumento do número de campanhas com o objetivo de verificar a influência dos períodos de cheia e de estiagem na S_d ;

- Amostragem em outros pontos ao longo do Rio Uberabinha, haja visto o uso múltiplo da água, de modo a possibilitar a modelagem espaço-temporal da S_d .

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 7181/2018. Solo-Análise Granulométrica. Rio de Janeiro/RJ. Brasil. 2018.
- ATTARD, K. M., RODIL, I. F., GLUD, R. N., BERG, P., NORKKO, J., NORKKO, A. (2019). Seasonal ecosystem metabolism across shallow benthic habitats measured by aquatic eddy covariance. *Limnology and oceanography letters*, 4(3), 79-86.
- CHALIMOND, María Laura; FERREYRA, Marina; COSSAVELLA, Ana María. Measurement of sediment oxygen demand rates for benthic demand of Tercero (Ctalamochita) River, Córdoba province, Argentina. *Tecnología y ciencias del agua*, v. 10, n. 2, p. 241-259, 2019.
- CHEN, C. *et al.* Impact of near-bed hydrodynamics and sediment chemistry on benthic oxygen demand. In: AGU Fall Meeting Abstracts. 2022. p. B26A-03.
- DRUCK, S.; CARVALHO, M.S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A.V.M. (eds) "Análise Espacial de Dados Geográficos". Brasília, EMBRAPA, 2004 (ISBN: 85-7383-260-6)
- FULWEILER, R. W.; NIXON, S. W.; BUCKLEY, B. A. Spatial and temporal variability of benthic oxygen demand and nutrient regeneration in an anthropogenically impacted New England estuary. *Estuaries and Coasts*, v. 33, p. 1377-1390, 2010.
- GARRISON, T. F. *et al.* Sediment oxygen demand and benthic foraminiferal faunas in the Arabian Gulf: A test of the method on a siliciclastic substrate. *Saudi Journal of Biological Sciences*, v. 28, n. 5, p. 2907-2913, 2021.
- LING, T. Y. NG, C. S. LEE, N. BUDA, D. Oxygen Demand of the Sediment from the Semariang Batu River, Malaysia. *World Applied Sciences Journal*, IDOSI Publications, p. 440-447, 2009.
- MEHRING, A. S. *et al.* Contribution of surface leaf-litter breakdown and forest composition to benthic oxygen demand and ecosystem respiration in a South Georgia blackwater river. *Freshwater Science*, v. 33, n. 2, p. 377-389, 2014.
- PASTOR, L. *et al.* Influence of the organic matter composition on benthic oxygen demand in the Rhône River prodelta (NW Mediterranean Sea). *Continental Shelf Research*, v. 31, n. 9, p. 1008-1019, 2011.
- PROVOOST, P. *et al.* Modelling benthic oxygen consumption and benthic-pelagic coupling at a shallow station in the southern North Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 120, p. 1-11, 2013.

- RIGAUD, S. *et al.* Benthic oxygen dynamics and implication for the maintenance of chronic hypoxia and ecosystem degradation in the Berre lagoon (France). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 258, p. 107437, 2021.
- ROVELLI, L. *et al.* Benthic O₂ uptake by coral gardens at the Condor seamount (Azores). *Marine Ecology Progress Series*, v. 688, p. 19-31, 2022.
- TOUSSAINT, F. A new device to follow temporal variations of oxygen demand in deltaic sediments: the LSCE benthic station. *Limnology and oceanography: Methods*, v. 12, n. 11, p. 729-741, 2014.
- TRUAX, D.D. SHINDALA, A. SARTAIN, H. Comparison of two sediment oxygen demand measurement techniques. *Journal of Environmental Engineering*. p. 619-624, September 1995.
- VON SPERLING, M. *Introdução a Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos*. Ed. UFMG, vol. 1, 3 ed., 2007.
- WALLACE, T. A.; GANF, G. G.; BROOKES, J. D. Sediment oxygen demand in a constructed lake in south-eastern Australia. *Journal of Environmental Management*, v. 181, p. 449-454, 2016.
- WILSON, T.; DEPAUL, V. In situ benthic nutrient flux and sediment oxygen demand in Barnegat Bay, New Jersey. *Journal of Coastal Research*, n. 78 (10078), p. 46-59, 2017.
- YEE, L. T. PUSIN, H. N. M. F. NYANTI, L. MIOD, M. C. Sediment Oxygen Demand of the Santubong River and Their Contributing Factors. *International Journal of Applied Science and Technology*, Centre for Promoting Ideas, USA, v. 1, n. 6, p. 162-168, November 2011.