

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

Aplicação do Método da Depleção Noturna de Oxigênio Dissolvido no Rio Passaúna para determinação do coeficiente de reaeração

*Pedro G. Grochocki Gabriel¹ ; Alexandre Sokoloski de Azevedo Delduque de Macedo² & Michael
Mannich³*

Resumo: O método da regressão noturna é amplamente utilizado para estimar a taxa de respiração em ecossistemas aquáticos com base na variação do oxigênio dissolvido (OD) durante o período noturno, quando a fotossíntese é negligenciável. No entanto, a precisão dessa técnica pode ser comprometida por inconsistências nos dados, como ruídos, outliers e falhas de medição, especialmente em séries temporais obtidas por sensores automáticos. Este estudo aplicou o método da regressão noturna no Rio Passaúna, em Curitiba (PR), incorporando a técnica de suavização LOESS (*Locally Estimated Scatterplot Smoothing*) para minimizar o impacto dessas inconsistências. O LOESS permite ajustar localmente a série de OD ao longo do tempo, filtrando flutuações atípicas sem eliminar tendências relevantes. A análise comparativa entre os resultados com e sem aplicação do LOESS demonstrou que a suavização melhora substancialmente a qualidade do ajuste linear noturno, aumentando o coeficiente de determinação (R^2) e reduzindo a dispersão dos resíduos. Esses resultados destacam a importância do pré-processamento cuidadoso dos dados na aplicação de métodos biofísicos e reforçam o potencial do LOESS como ferramenta complementar em estudos de metabolismo aquático.

Palavras-Chave – Reaeração, Metabolismo Aquático, Suavização LOESS

1. INTRODUÇÃO

A concentração de oxigênio dissolvido (OD) em corpos d'água é um indicador fundamental da qualidade ambiental e do equilíbrio dos processos biogeoquímicos aquáticos. A análise das variações temporais do OD permite inferir o metabolismo aquático, incluindo a produtividade primária bruta, respiração do ecossistema e produção líquida (Odum, 1956).

O método da regressão noturna é amplamente utilizado para estimar a taxa de respiração e o coeficiente de reaeração em ecossistemas aquáticos. Durante o período noturno, a ausência de luz solar interrompe a fotossíntese, de modo que a variação do OD ao longo do tempo seja atribuída, predominantemente, à respiração dos organismos e às trocas gasosas com a atmosfera (Grace et al., 2015). O método consiste em uma análise de regressão linear da curva de decréscimo do OD noturno, de modo a calcular a taxa de respiração e o coeficiente de reaeração do ecossistema.

No entanto, a aplicação prática da regressão noturna enfrenta desafios, especialmente quando se trabalha com dados de alta frequência coletados por sondas automáticas. Esses dados estão

¹) Universidade Federal do Paraná – Curitiba-PR, (41) 99602-0412, pedrogrochocki@ufpr.br

²) Universidade Federal do Paraná – Curitiba-PR, (41) 99602-0412, alexandresokoloski@ufpr.br

³) Universidade Federal do Paraná – Curitiba-PR, (41) 99602-0412, mannich@ufpr.br

sujeitos a inconsistências, como ruídos instrumentais, picos abruptos e valores atípicos, que podem comprometer a acurácia das estimativas da taxa de respiração (Saltarelli, 2017). Além disso, em ambientes sujeitos a alterações rápidas, como rios regulados ou locais sob influência de estruturas artificiais, a turbulência, variações de temperatura e presença de correntes podem introduzir comportamentos não lineares nos dados noturnos (Suhett et al., 2006), afastando o comportamento real das premissas simplificadoras do modelo.

Para mitigar o impacto dessas inconsistências, técnicas de pré-processamento e filtragem são essenciais. A suavização de séries temporais é uma abordagem eficaz para lidar com dados ruidosos. O LOESS (Locally Estimated Scatterplot Smoothing) é um método de regressão local não paramétrico que ajusta suavemente séries temporais, permitindo capturar variações locais sem impor uma estrutura global à série (Cleveland & Devlin, 1988).

O Rio Passaúna, localizado na região metropolitana de Curitiba, Paraná, Brasil, é uma das principais fontes de abastecimento de água da cidade. A bacia hidrográfica do Passaúna abrange áreas urbanas e rurais, estando sujeita a diversas pressões antrópicas, como expansão urbana, atividades agrícolas e alterações no uso do solo (Aisse et al., 1990).

Neste contexto, o presente estudo visa aplicar o método da regressão noturna no Rio Passaúna, incorporando a técnica de suavização LOESS para mitigar inconsistências nos dados de OD. A análise comparativa entre os resultados com e sem aplicação do LOESS permitirá avaliar a eficácia da suavização na melhoria da qualidade dos ajustes lineares noturnos.

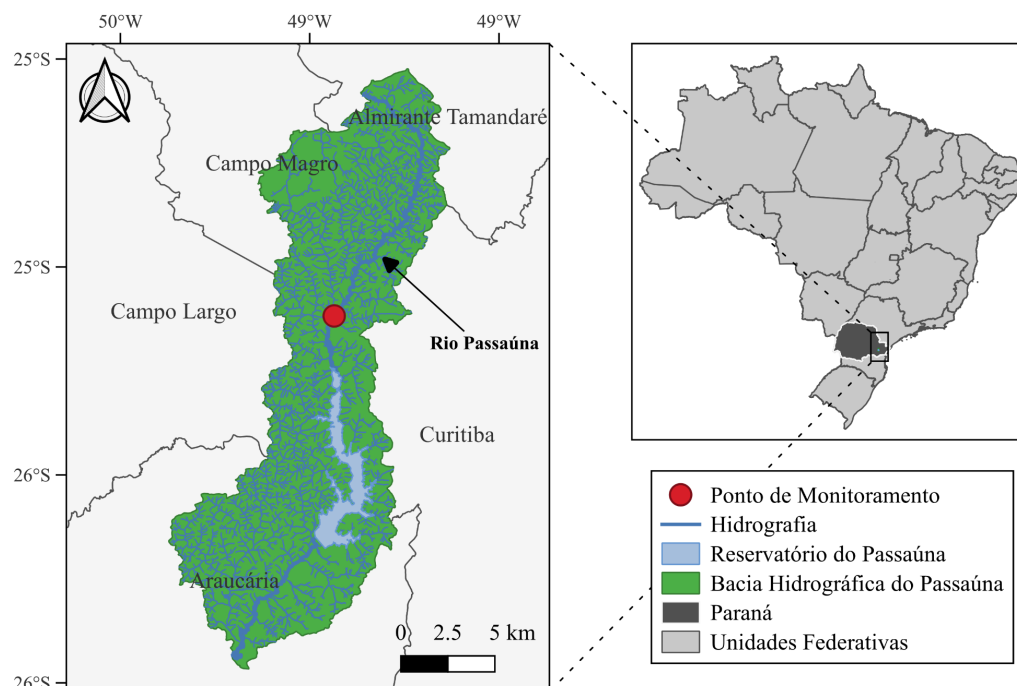
2. MATERIAIS E MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi conduzido no Rio Passaúna, localizado na Região Metropolitana de Curitiba, estado do Paraná, sul do Brasil (25°27'S, 49°25'W), conforme ilustra a Figura 1. O rio faz parte da bacia hidrográfica do reservatório do Passaúna, que abastece cerca de 20% da população da cidade de Curitiba (IAP, 2012). A bacia apresenta um uso do solo predominantemente urbano e agrícola, refletindo a expansão da região metropolitana de Curitiba e as atividades agropecuárias locais, como o cultivo de milho, soja e pastagens. Remanescentes da vegetação nativa da Mata Atlântica ainda ocorrem em áreas protegidas, especialmente em encostas (Silva et al., 2016; Freitas et al., 2017; Santos et al., 2019).

Do ponto de vista hidrológico, a bacia do Passaúna é caracterizada por um regime de chuvas bem distribuídas ao longo do ano, com precipitação média anual entre 1400 e 1600 mm. O relevo moderadamente acidentado favorece o escoamento rápido, especialmente nas áreas urbanizadas, elevando o risco de enchentes e erosão. A infiltração da água no solo varia conforme o uso do solo, sendo reduzida em áreas impermeabilizadas e maior nas regiões florestais e agrícolas. Além disso, o sistema aquífero subterrâneo interage com a rede superficial, influenciando a disponibilidade hídrica em períodos secos, o que é fundamental para o abastecimento da região (Carmo et al., 2015; Almeida et al., 2017; Ferreira et al., 2020).

Figura 1 – Localização do ponto de monitoramento e da área de estudo.



COLETA DE DADOS

Os dados de OD foram obtidos com sensores MiniDOT Logger (Precision Measurement Engineering, Inc.) entre os anos de 2018 e 2020. Esses equipamentos possuem faixa de medição de 0 a 20 mg L⁻¹, resolução de 0,01 mg L⁻¹, precisão de $\pm 0,2$ mg L⁻¹ com compensação automática de temperatura (PME, 2018).

Os sensores foram instalados em profundidade de aproximadamente 0.5 m abaixo da superfície e configurados para a aquisição de dados a cada 10 minutos.

DELIMITAÇÃO DO PERÍODO NOTURNO

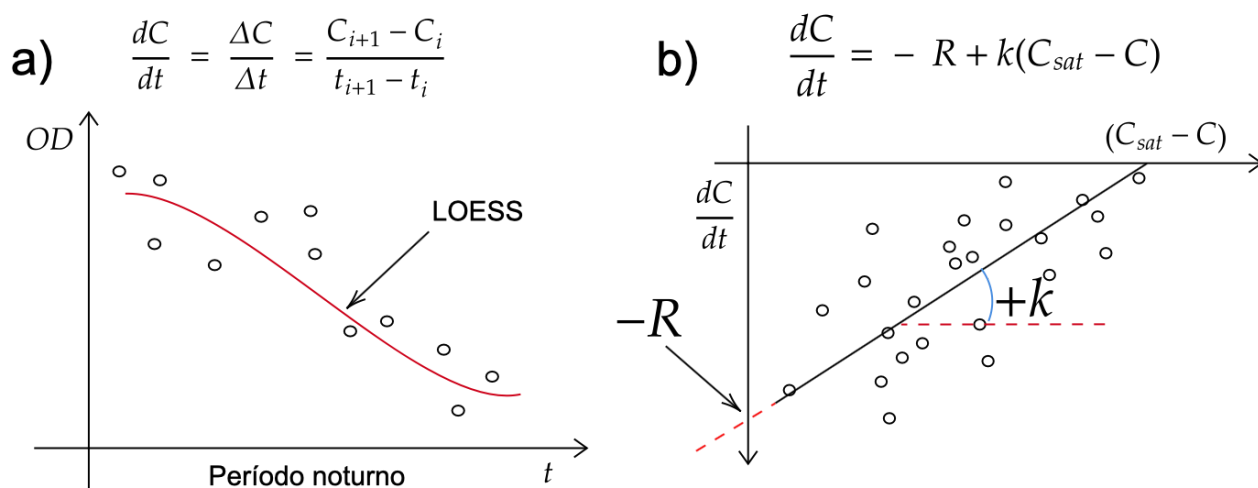
Para garantir que apenas os processos de respiração e reaeração fossem dominantes, foram utilizados exclusivamente dados coletados durante o período noturno, definidos como o intervalo de tempo compreendido entre 1 hora após o pôr do sol e 1 hora antes do nascer do sol. Os horários solares foram calculados com base na posição geográfica do local de coleta, usando scripts do pacote `suncalc` no R (Thieurmél & Elmarhraoui, 2019).

APLICAÇÃO DA REGRESSÃO NOTURNA

O método da regressão noturna foi aplicado individualmente a cada noite. A regressão linear foi ajustada sobre os valores de OD em função do tempo. A inclinação da reta ajustada (em mg L⁻¹ h⁻¹) reflete a taxa líquida de consumo de oxigênio por respiração e troca com a atmosfera (Figura 2) (Staehr et al., 2010; Bernhardt et al., 2022). Sendo o coeficiente linear (R) negativo e representando o consumo, k , o coeficiente angular, é positivo e representa a velocidade de transferência de gases.

Figura 2 – Representação gráfica da aplicação do método da Regressão Noturna. Em a) tem-se os dados de OD(t) a noite e a linha contínua representa o ajuste com o LOESS. Em b) tem-se a

aplicação do método da depleção noturna em que o coeficiente angular representa o coeficiente de reaeração e o coeficiente linear representa a taxa de respiração.



Para aumentar a confiabilidade dos resultados buscou-se dados com maiores amplitudes de variações de OD e consequentemente do déficit ($C_{sat} - C$), minimizando efeitos da precisão e resolução do equipamento. Desta forma foram consideradas apenas noites com ao menos 6 horas de dados válidos. A qualidade do ajuste foi avaliada pelo coeficiente de determinação (R^2) e pelo erro padrão da estimativa. Os dados foram padronizados para a temperatura de 20 °C (k_{20} , em d^{-1}) corrigido conforme a equação $k_{20} = k_t \theta^{(T-20)}$.

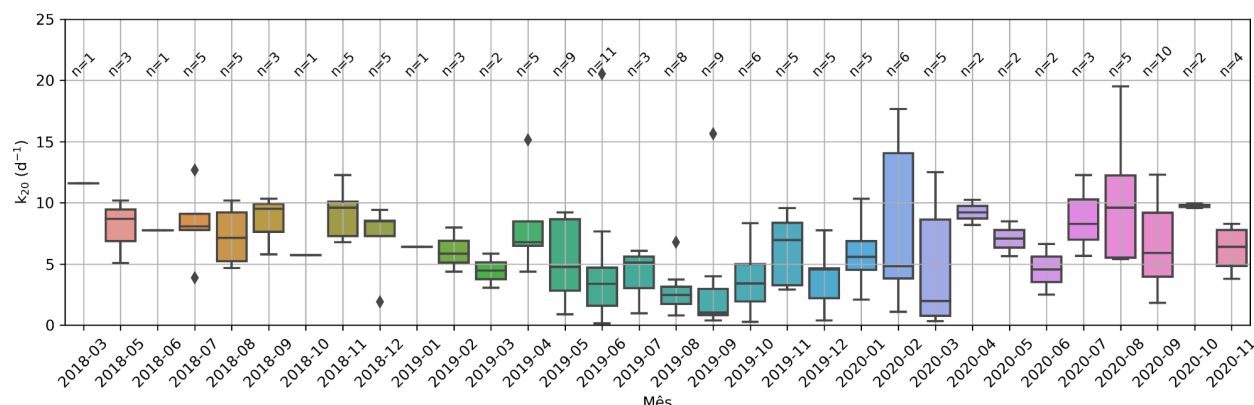
SUAVIZAÇÃO COM LOESS

Antes da aplicação das regressões, os dados de OD foram suavizados por meio da técnica LOESS, com o objetivo de remover/atenuar as inconsistências de curta duração (ruídos, picos espúrios) sem comprometer a tendência geral dos dados. Essa abordagem permite maior robustez na identificação das variações persistentes de OD e decorrentes dos processos dominantes ao longo da noite (Cleveland et al., 1992; Jacoby, 2000). A suavização LOESS foi aplicada com um parâmetro de suavização de 0.15. Esse valor foi considerado ideal por reduzir ruídos residuais sem comprometer a estrutura temporal das curvas de decaimento do oxigênio dissolvido durante o período noturno.

3. RESULTADOS

A Figura 3 apresenta a variação temporal da constante de reaeração a 20 °C (k_{20} , em d^{-1}) estimada pelo método da regressão noturna com suavização LOESS para o período de 2018 a 2020. Os valores mostram alta variabilidade intranual, com mediana mensal variando aproximadamente entre 2 d^{-1} e 13 d^{-1} , e valores extremos chegando a 20 d^{-1} em alguns casos.

Figura 3 – Variação mensal dos coeficientes de reaeração à 20 °C (k_{20}). As caixas representam os quartis (Q1 a Q3), a linha horizontal dentro da caixa indica a mediana, os limites superiores e inferiores representam os valores dentro de 1,5 vezes o intervalo interquartil, e os pontos fora desses limites são outliers.



Comparando com os métodos clássicos de estimativa da constante de reaeração (Tabela 1), observa-se que os valores obtidos neste estudo são, em média, mais elevados. Lima (2023) calculou taxas utilizando diferentes abordagens e observou que os métodos empíricos baseados em fórmulas hidrodinâmicas apresentaram valores médios significativamente menores. Por exemplo, os métodos de Langbein e Durum (1967) resultaram em $2,1 \pm 0,5 \text{ d}^{-1}$, enquanto o de O'Connor e Dobbins (1958) indicou $2,7 \pm 0,7 \text{ d}^{-1}$. Mesmo aqueles com estimativas mais elevadas, como Melching e Flores (1999), com $8,4 \pm 0,4 \text{ d}^{-1}$, e o método delta aproximado, com $6,4 \pm 10,1 \text{ d}^{-1}$, tendem a apresentar valores inferiores ao máximo observado neste estudo.

Tabela 1 – Comparação entre os valores de k_{20} (d^{-1}) obtidos no Rio Passaúna (2018–2020) e os estimados por métodos empíricos (adaptado de Lima, 2023).

Método Empírico	Média k_{20} (d^{-1})	Desvio padrão (d^{-1})
Regressão noturna (este estudo)	6,2	4,0
O'Connor e Dobbins (1958)	2,7	0,7
Owens, Edwards e Gibbs (1964)	5,8	1,2
Langbein e Durum (1967)	2,1	0,5
Tsivoglou e Wallace (1972)	4,9	1,4
Smoot (1988)	6,6	0,7

Melching e Flores (1999)	8,4	0,4
Método delta	6,4	101,0
Appling, A. P. (2017)	10,0	-

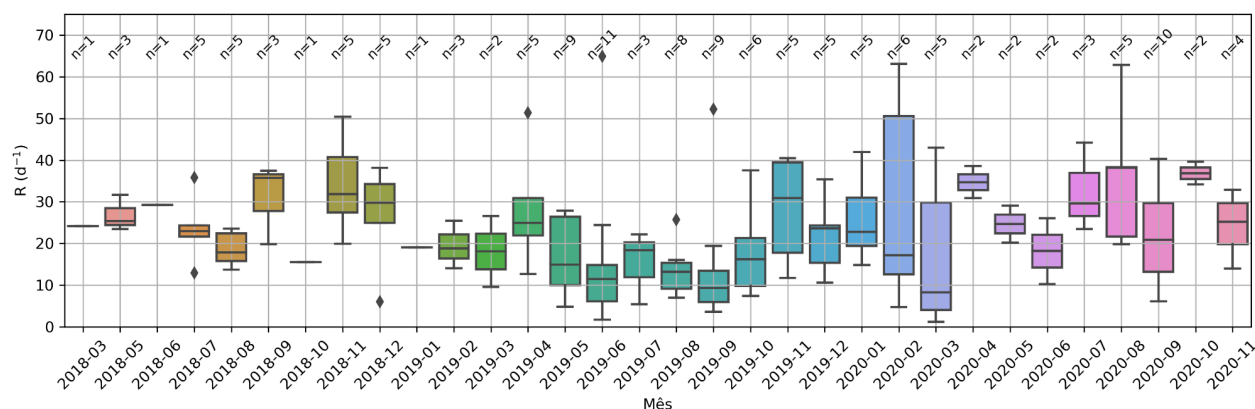
Comparando os valores de k_{20} obtidos com métodos da literatura, observou-se que 78,6% ficaram acima dos calculados por Langbein e Durum (1967), 74,5% acima de O'Connor e Dobbins (1958), 29,7% acima de Melching e Flores (1999), e 4,1% acima do método delta aproximado. Para o modelo de Appling (2017), 20,7% dos valores ultrapassaram o limite.

Essa diferença pode ser atribuída ao fato de que os métodos indiretos (equações paramétrica) foram desenvolvidos com base em ajustes de equações com base nas propriedades hidráulicas de diferentes rios, refletindo tendências relativas a estes parâmetros. Enquanto o presente estudo utilizou dados in situ de alta frequência, permitindo determinar o coeficiente variando a cada dia e condição do rio, refletidos pela variabilidade dos resultados, típicos de dados ambientais..

Vale destacar também que o uso da suavização LOESS contribuiu para reduzir a influência de ruídos e outliers nos dados, aumentando a robustez das estimativas diárias de k_{20} . Adicionalmente, a premissa do método é que o escoamento seja permanente e as vazões variem ao longo do tempo, alterando também o nível d'água, a velocidade do escoamento e influenciando, no coeficiente de reaeração. Desta forma, nota-se a maior variabilidade dos dados.

A aplicação do método de regressão noturna permitiu estimar o R ao longo de diferentes períodos, revelando uma variação sazonal considerável (Figura 4). Os valores mensais oscilaram amplamente entre os anos de 2018 e 2020, com destaque para meses em que foram observadas taxas elevadas de consumo, como janeiro e fevereiro de 2020, sugerindo uma intensificação dos processos heterotróficos nesses períodos.

Figura 4 – Variação mensal do consumo (R). As caixas representam os quartis (Q1 a Q3), a linha horizontal dentro da caixa indica a mediana, os limites superiores e inferiores representam os valores dentro de 1,5 vezes o intervalo interquartil, e os pontos fora desses limites são outliers.



Essa variação pode estar associada a múltiplos fatores, incluindo o aumento da temperatura da água, a disponibilidade de matéria orgânica e possíveis episódios de maior decomposição biológica. Períodos mais quentes, como os meses de verão e transição para o outono, tendem a favorecer a atividade microbiana e, consequentemente, elevar o consumo de oxigênio.

Por outro lado, meses com valores medianos mais baixos, como junho e julho de 2019, refletem condições ambientais menos favoráveis à atividade biológica ou menor acúmulo de matéria orgânica disponível.

De modo geral, os resultados evidenciam a importância de se considerar a variabilidade temporal ao estudar o metabolismo aquático. A alternância entre períodos de maior e menor consumo reforça o caráter dinâmico do sistema e a necessidade de medições contínuas para compreender a magnitude e os fatores que controlam o consumo de oxigênio em ambientes lênticos tropicais.

Até o momento, não foram encontrados na literatura estudos que tenham estimado o coeficiente de reaeração e consumo de forma contínua ao longo de séries temporais extensas como a utilizada neste trabalho. A maioria dos estudos limitam-se a períodos curtos, geralmente de poucos dias ou semanas, muitas vezes vinculados a campanhas pontuais de monitoramento. A abordagem adotada com aplicação sistemática do método ao longo de quase três anos, permitiu observar padrões sazonais e a variabilidade interanual do metabolismo respiratório do sistema.

4. CONCLUSÃO

O método da regressão noturna com suavização LOESS demonstrou ser uma ferramenta robusta para determinar o coeficiente de reaeração em escala mensal com base em séries temporais de oxigênio dissolvido. Os resultados mostraram que o coeficiente de reaeração no Rio Passaúna variou sazonalmente e, na maioria dos casos, apresentou valores mais altos do que os estimados por métodos empíricos clássicos. Em especial, 78,6% dos valores de k_{20} superaram as estimativas por Langbein e Durum (1967) e 74,5% o de O'Connor e Dobbins (1958). Mesmo em comparação com métodos que preveem taxas mais elevadas, como Melching e Flores (1999) e Appling (2017), parte significativa dos dados ainda ficou acima.

Essa diferença ressalta a importância de utilizar abordagens baseadas em dados locais e de alta resolução para representar com maior fidelidade os processos limnológicos.

Os resultados valorizam o monitoramento de alta frequência como estratégia complementar para compreender a dinâmica e metabolismo em rios e o cruzamento dessas estimativas com variáveis hidrológicas e meteorológicas, a fim de compreender com maior profundidade os mecanismos que controlam a variabilidade da reaeração.

REFERÊNCIAS

- Aisse, M. M., et al. (1990). Qualidade da água e percepção ambiental na bacia hidrográfica do rio Passaúna. XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Link
- Almeida, R. A., Silva, L. A., & Souza, J. R. (2017). Caracterização morfométrica e hidrológica da bacia hidrográfica do rio Passaúna, Paraná. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 22(3), e34. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.011717>

- Appling, A. P., Hall, R. O., Yackulic, C. B., & Arroita, M. (2018). Overcoming equifinality: Leveraging long time series for stream metabolism estimation. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 123(2), 624–645. <https://doi.org/10.1002/2017JG004140>
- Bernhardt, E. S., et al. (2022). Toward a unified framework for river metabolism. *Limnology and Oceanography Letters*, 7(1), 55–64.
- Carmo, F. G. S., Santos, L. A., & Oliveira, M. A. (2015). Precipitação e balanço hídrico na bacia hidrográfica do Passaúna, Paraná. *Revista Ambiente & Água*, 10(2), 415-426. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1546>
- Cleveland, W. S., & Devlin, S. J. (1988). Locally weighted regression: an approach to regression analysis by local fitting. *Journal of the American Statistical Association*, 83(403), 596–610.
- Cleveland, W. S., Grosse, E., & Shyu, W. M. (1992). Local regression models. In: *Statistical Models in S* (Eds. Chambers, J. M. & Hastie, T. J.). Chapman & Hall.
- Ferreira, C. R., Silva, E. M., & Rodrigues, P. L. (2020). Influência do uso do solo na infiltração e escoamento superficial na bacia do rio Passaúna, Paraná. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 25(6), 1189-1198. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522020162543>
- Freitas, M. V., Lima, J. F., & Costa, D. R. (2017). Uso do solo e impactos ambientais na bacia hidrográfica do Passaúna. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 10(4), 1345–1356.
- Grace, M. R., Giling, D. P., Hladyz, S., Caron, V., Thompson, R. M., & Mac Nally, R. (2015). Fast processing of diel oxygen curves: estimating stream metabolism with base (flow) separation. *Limnology and Oceanography: Methods*, 13(3), 103–114.
- Jacoby, W. G. (2000). Loess: a nonparametric, graphical tool for depicting relationships between variables. *Electoral Studies*, 19(4), 577–613.
- Krusche, A. V., et al. (2019). Inland waters and biogeochemical processes in the Southern Hemisphere. *Biogeosciences*, 16, 847–863.
- Langbein, W. B., & Durum, W. H. (1967). The aeration capacity of streams. United States Geological Survey Circular 542, U.S. Government Printing Office.

- Lima, M. F. D. S.; Mannich, M. (2023). Estimativa do coeficiente de reaeração no rio Passaúna (PR) pelo método Delta. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 25., Aracaju. Anais [...]. Porto Alegre: ABRHidro. <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=15266>
- McBride, G. B., & Chapra, S. C. (2005). Rapid calculation of oxygen reaeration coefficients for streams. *Journal of Environmental Engineering*, 131(7), 1067–1076. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2005\)131:7\(1067\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2005)131:7(1067))
- Melching, C. S., & Flores, H. E. (1999). Reaeration equations derived from US Geological Survey database. *Journal of Environmental Engineering*, 125(5), 407–414. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1999\)125:5\(407\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1999)125:5(407))
- Odum, H. T. (1956). Primary production in flowing waters. *Limnology and Oceanography*, 1(2), 102–117.
- O'Connor, D. J., & Dobbins, W. E. (1958). Mechanism of reaeration in natural streams. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 123, 641–684.
- Oliveira, P. C., Santos, R. M., & Nascimento, F. B. (2018). Dinâmica do uso e cobertura do solo na bacia hidrográfica do Passaúna. *Revista Brasileira de Geografia*, 75(1), 45–60.
- Owens, M., Edwards, R. W., & Gibbs, J. W. (1964). Some reaeration studies in streams. *International Journal of Air and Water Pollution*, 8, 469–486.
- PME – Precision Measurement Engineering (2018). MiniDOT Logger User Manual. Available at: <https://www.pme.com>
- Read, J. S., et al. (2016). Deriving lake mixing and stratification indices from high-resolution lake buoy data. *Environmental Modelling & Software*, 86, 13–26.
- Saltarelli, W. A. (2017). Avaliação da reaeração em rios urbanos utilizando o método de regressão noturna. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo. Link
- SANEPAR – Companhia de Saneamento do Paraná. (2020). Relatório de sustentabilidade 2020.

- Santos, A. L., Pereira, T. J., & Gomes, F. A. (2019). Remanescentes florestais e sua importância na bacia do Passaúna para a conservação ambiental. *Floresta e Ambiente*, 26(2), e20180073. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.007318>
- Saunitti, F. (2003). Análise da percepção ambiental na bacia hidrográfica do rio Passaúna. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná.
- Silva, D. A., Oliveira, M. S., & Costa, R. F. (2016). Impacto da urbanização na qualidade da água da bacia hidrográfica do Passaúna. *Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, 5(3), 89–99.
- Smoot, J. L. (1988). Estimating stream reaeration coefficients from empirical and computer models. *Journal of Environmental Engineering*, 114(5), 1013–1031.
- Staehr, P. A., et al. (2010). Lake metabolism and the diel oxygen technique: state of the science. *Limnology and Oceanography: Methods*, 8(11), 628–644.
- Suhett, A. L., Amado, A. M., Bozelli, R. L., Esteves, F. A., & Farjalla, V. F. (2006). O papel da fotodegradação do carbono orgânico dissolvido (COD) nos ecossistemas aquáticos. *Oecologia Brasiliensis*, 10(2), 186–204.
- Thieurmel, B., & Elmarhraoui, A. (2019). suncalc: Compute Sun Position, Sunlight Phases, Moon Position and Lunar Phase. R package version 0.5.0.
- Tsivoglou, E. C., & Wallace, R. H. (1972). Characterization of stream reaeration capacity. U.S. Environmental Protection Agency, EPA-R3-72-012.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e com os dados desenvolvidos pelo projeto Multidisciplinary Data Acquisition as Key for a Globally Applicable Water Resource Management.