

Curvas de permanência de carga como abordagem alternativa para a gestão de recursos hídricos

Load duration curves as an alternative approach to water resources management

Julia Bianek¹ , Cristóvão Vicente Scapulatempo Fernandes¹ , Michael Mannich¹ 

¹Universidade Federal do Paraná - UFPR, Curitiba, PR, Brasil. E-mails: bianekjulia@gmail.com, cris.dhs@ufpr.br, man nich@ufpr.br

Como citar: Bianek, J., Fernandes, C. V. S., & Mannich, M. (2025). Curvas de permanência de carga como abordagem alternativa para a gestão de recursos hídricos. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, 22, e19. <https://doi.org/10.21168/rega.v22e19>

RESUMO: *Este estudo apresenta uma contribuição para a gestão da quali-quantitativa na bacia hidrográfica do Alto Iguaçu, localizada na Região Metropolitana de Curitiba (RMC), integrando parâmetros quantitativos (vazão) e qualitativos (demanda bioquímica de oxigênio - DBO e fósforo) por meio da aplicação de curvas de permanência de carga, com o objetivo de verificar o atendimento ao enquadramento dos corpos d'água em classes, conforme a Resolução Coalier nº 04/2013. O Método envolve a análise de séries históricas de vazão e qualidade da água (1980-2022) de nove estações de monitoramento, a elaboração de curvas de permanência de carga para DBO e fósforo e a identificação da necessidade de redução de carga em diferentes condições hidrológicas. Os resultados indicaram um atendimento parcial ao enquadramento da bacia hidrográfica para os parâmetros avaliados. O trecho central do rio Iguaçu, especialmente na área de influência da estação Guajuvira, destacou-se como um ponto crítico devido à intensa urbanização, ao desenvolvimento industrial e às múltiplas fontes de poluição, exigindo prioritariamente a redução das cargas de DBO e fósforo. A análise sugere que a DBO tem origem predominantemente em fontes pontuais, enquanto o fósforo apresenta maior contribuição de fontes difusas. Para o fósforo, observaram-se concentrações elevadas a jusante dos Reservatórios Verde e Piraquara I e II indicando um possível efeito da regularização da vazão, mascarando efeitos de cargas difusas a montante como fontes contínuas. A aplicação das curvas de permanência de carga demonstrou ser uma ferramenta útil para o diagnóstico da qualidade da água, a identificação de áreas prioritárias para intervenção e a definição de metas de redução de carga em diferentes cenários hidrológicos.*

Palavras-chave: Curvas de Permanência de Carga; Qualidade da Água; Gestão de Recursos Hídricos.

ABSTRACT: *This study contributes to qualitative-quantitative water resources management in the Alto Iguaçu River Basin, located in the Metropolitan Region of Curitiba (RMC), by integrating quantitative (streamflow) and qualitative (biochemical oxygen demand - BOD and phosphorus) parameters through the application of load duration curves. The objective is to assess compliance with water quality classifications established by Coalier Resolution No. 04/2013. The method involves the analysis of historical streamflow and water quality data (1980–2022) from nine monitoring stations, developing load duration curves for BOD and phosphorus, and identifying required load reductions under different hydrological conditions. Results indicate partial compliance with classification standards for the evaluated parameters. The central reach of the Iguaçu River, particularly near the Guajuvira station, was identified as a critical area due to intense urbanization, industrial development, and multiple pollution sources, requiring prioritized BOD and phosphorus load reductions. The analysis suggests that BOD primarily originates from point sources, whereas phosphorus has a greater contribution from diffuse sources. For phosphorus, elevated concentrations were observed downstream of the Verde and Piraquara I and II reservoirs, indicating a possible effect of flow regulation, which may mask the influence of upstream diffuse loads acting as continuous sources. The application of load duration curves proved useful for diagnosing water quality, identifying priority areas for intervention, and setting load reduction targets across various hydrological scenarios.*

Keywords: Load Duration Curves; Water Quality; Water Resources Management.

1. Introdução

A Lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), estabelece as diretrizes para a gestão dos recursos hídricos no Brasil. A PNRH define a bacia hidrográfica como a unidade territorial de planejamento e regulamenta a gestão da água por meio de instrumentos que visam regular, controlar, preservar e recuperar os recursos hídricos (Brasil, 1997).

Recebido: Abril 28, 2025. Revisado: Setembro 05, 2025. Aceito: Setembro 22, 2025.

 Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Attribution (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

A gestão proposta pela PNRH enfatiza o uso múltiplo das águas, buscando garantir a disponibilidade em quantidade e qualidade adequadas para esses usos. Nesse contexto, o monitoramento integrado dos aspectos quantitativos e qualitativos da água emerge como uma ferramenta essencial para uma gestão eficiente dos recursos hídricos.

O monitoramento integrado da quantidade e qualidade da água fornece uma base de dados sólida sobre o comportamento atual e as tendências dos corpos d'água, o que é fundamental para a aplicação dos instrumentos de gestão definidos na PNRH, como a outorga de uso, a cobrança pelo uso da água e o enquadramento dos corpos hídricos em classes de qualidade (Formigoni et al., 2011; Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2019). Contudo, a maioria dos programas de monitoramento se limita a coletar e apresentar grandes volumes de dados sem uma adequada sistematização e análise (Cunha & Calijuri, 2010), e, geralmente, não são contínuos no tempo. Em resposta a essa lacuna, diversas pesquisas têm explorado metodologias que integram dados qualitativos e quantitativos, que relacionam parâmetros de vazão e qualidade da água (Cleland, 2002, 2003; Brites, 2010; Cunha & Calijuri, 2010; Marques et al., 2019; Serrano et al., 2020; Rodrigues et al., 2022), também chamadas de cargas.

As curvas de permanência, amplamente utilizadas em estudos hidrológicos, oferecem uma visão abrangente do comportamento de um rio, apresentando a frequência de ocorrência de determinados eventos de vazão e sua probabilidade de excedência (Naghettini & Pinto, 2007; Cruz & Tucci, 2008; Cunha et al., 2012; Detzel et al., 2016; Machado et al., 2019; Marques et al., 2019). Essas curvas vêm sendo adaptadas para incorporar parâmetros de qualidade da água, permitindo a avaliação integrada dos aspectos hidrológicos e de qualidade da água (Cunha & Calijuri, 2010; Marques et al., 2019; Wang et al., 2019; Xie et al., 2019; Serrano et al., 2020; Reyes et al., 2020; Woo et al., 2021; Law et al., 2022; Rodrigues et al., 2022).

A integração de parâmetros qualitativos e quantitativos pode ser representada por meio de curvas de permanência, elaboradas de forma análoga às curvas de permanência de vazão. Essas curvas são obtidas ao multiplicar os valores de vazão por uma concentração específica de um parâmetro de qualidade da água (Cleland, 2002, 2003; United States Environmental Protection Agency, 2007; Machado et al., 2019), que pode ser um valor observado ou uma meta de qualidade. Autores brasileiros adaptaram esse conceito ao processo de classificação dos corpos de água, associando as curvas de permanência aos limites de concentração de determinados parâmetros de qualidade da água, conforme definido pela Resolução nº 357/2005, do Conselho Nacional de Meio Ambiente (Conama) (Brasil, 2005). Essa abordagem gera curvas de permanência de cargas, utilizadas para analisar a concentração máxima admissível de determinados parâmetros de qualidade em cada trecho de rio (Machado et al., 2019), podendo ser aplicado a diversos parâmetros de qualidade da água, como DBO, fósforo e coliformes totais ou termotolerantes.

A metodologia das curvas de permanência de carga possibilita a visualização da conformidade com padrões de qualidade, identificando o tempo em que os parâmetros atendem aos limites legais e determinando a carga admissível para diferentes vazões. Além disso, ao relacionar os dados de qualidade com as condições de vazão, a metodologia permite inferir o tipo de fonte de poluição, indicando se as principais fontes para o trecho analisado podem ser de origem pontual ou difusa, conforme as condições de vazão do corpo hídrico (Cleland, 2002, 2003; United States Environmental Protection Agency, 2007; Cruz & Tucci, 2008; Cunha & Calijuri, 2010; Cunha et al., 2012; Marques et al., 2019; Wang et al., 2019; Xie et al., 2019; Serrano et al., 2020).

Este estudo avalia a qualidade da água integrando parâmetros quantitativos e qualitativos por meio de curvas de permanência de carga, comparando as cargas observadas com as cargas máximas admissíveis e verificando o cumprimento dos padrões vigentes. O método permite identificar locais que necessitam de redução no aporte de poluentes, quantificar essas reduções e associá-las ao tipo de fonte de poluição (pontual ou difusa). Assim, a pesquisa explora o potencial da abordagem probabilística como ferramenta integrada para a gestão dos recursos hídricos e, principalmente, para a avaliação da qualidade da água quando da implementação dos instrumentos de enquadramento dos corpos hídricos previstos em lei. Os resultados tornam mais visível a identificação de áreas prioritárias para ações de despoluição, além de fornecerem indícios sobre as principais fontes poluidoras, orientando a definição de medidas mais eficazes.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo e Seleção das estações

O estudo de caso abrange a bacia hidrográfica do Alto Iguaçu, localizada na Região Metropolitana de Curitiba (RMC), entre a Serra do Mar e a Escarpa Devoniana, com uma extensão de aproximadamente 3.638 km² (Paraná, 2007a). Essa bacia hidrográfica abrange total ou parcialmente 18 municípios, dos

quais 16 integram a RMC. A RMC possui pouco mais de 3,5 milhões de habitantes, correspondendo a cerca de 30% da população do estado do Paraná (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2022). A população estimada para a área da bacia hidrográfica do Alto Iguaçu é de cerca de 2,8 milhões de habitantes (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2023).

Além da intensa ocupação urbana, observa-se uma expansão do setor industrial na área, o que exerce pressão significativa sobre os recursos hídricos locais (Sá & Silva, 2019; Stefan & Fernandes, 2020). A água é um fator limitante para o desenvolvimento da região, especialmente nas áreas densamente urbanizadas, onde as altas demandas de abastecimento para diversos usos têm sido comprometidas pela deterioração da qualidade da água (Leithold et al., 2017; Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social, 2017; Mizukawa et al., 2019; Stefan & Fernandes, 2020; Almeida et al., 2023). Observa-se, entretanto, uma tendência de melhora na qualidade da água à medida que se afasta das áreas urbanizadas, devido à redução das fontes de poluição e ao efeito de diluição ao longo do curso d'água (Salzmann & Mannich, 2015; Leithold et al., 2017; Bianek, 2023).

O enquadramento dos corpos hídricos da bacia hidrográfica foi estabelecido em 2013 pela Resolução nº 04/2013 do Comitê das Bacias do Alto Iguaçu e Afluentes do Alto Ribeira (2013). Esse enquadramento foi definido com base no parâmetro de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), seguindo um padrão comum nos enquadramentos no Brasil e na avaliação da qualidade da água (Jouanneau et al., 2014; Bitencourt et al., 2019). No entanto, a poluição na bacia hidrográfica não é causada exclusivamente por efluentes domésticos. Fontes industriais, drenagem urbana, uso do solo e atividades agrícolas também influenciam a qualidade da água nesta área (Bitencourt, 2018; Kozak & Fernandes, 2022; Stefan & Fernandes, 2020; Almeida et al., 2023), o que evidencia a necessidade de se analisar parâmetros complementares, como nutrientes e metais, para obter uma compreensão mais abrangente da qualidade da água na região.

Diante da complexidade das fontes de poluição que impactam a qualidade da água na bacia hidrográfica e da necessidade de uma análise integrada para garantir o cumprimento do enquadramento estabelecido, séries históricas de vazão e qualidade da água foram então utilizadas para uma avaliação. As séries históricas de vazão e qualidade da água foram obtidas junto ao Sistema de Informações Hidrológicas do Instituto Água e Terra (IAT) (Instituto Água e Terra, 2022). Para a seleção das estações de monitoramento, foram adotados os seguintes critérios: as estações deveriam monitorar simultaneamente vazão e qualidade da água, possuir mais de 20 anos de registro contínuo e apresentar dados disponíveis para pelo menos três anos no período de 2014 a 2022, o que se justifica como uma amostra representativa do período recente.

Quanto às séries de vazão, visando assegurar uma representação robusta da probabilidade de excedência das vazões, optou-se pela análise exclusiva dos anos com dados completos. Excluíram-se, portanto, os anos com falhas prolongadas, como a ausência de dados por um mês inteiro ou aqueles com mais de 20% de lacunas nas medições diárias. Para as séries de qualidade da água, foram identificados os anos em que havia medições disponíveis, garantindo a consistência temporal. A partir das séries consolidadas, foi possível determinar o número total de anos com registros simultâneos de qualidade da água e vazão em cada estação. As séries foram tratadas como estacionárias e homogêneas, e os anos considerados na análise indicados na Figura 1. A localização das estações na bacia hidrográfica de estudo está representada na Figura 2, com informações sobre cada estação e o respectivo curso de água, descritas no Quadro 1.

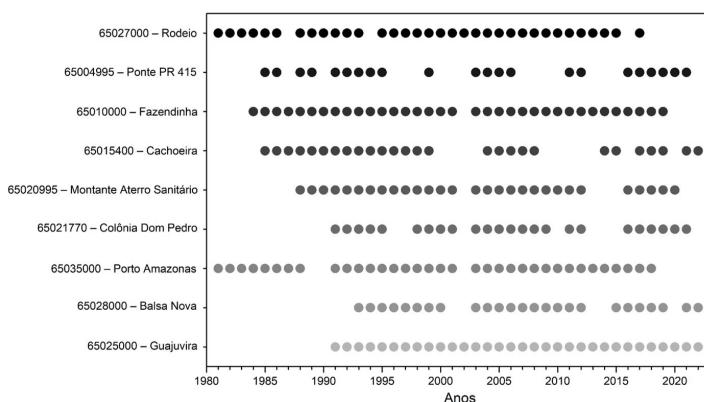


Figura 1 – Estações selecionadas, que apresentaram medições simultâneas de vazão e qualidade, dentro dos critérios estabelecidos no estudo.

Fonte: Adaptado de Instituto Água e Terra (2022).

Quadro 1 – Informações das Estações Selecionadas

Código da estação	Nome da Estação	Sub-bacia	Rio	Classe*	Área de drenagem (km ²)	Série Histórica (Anos)
65025000	Guajuvira	Área de contribuição direta Iguaçu	Iguaçu	4	2.577,76	32
65028000	Balsa Nova	Área de contribuição direta Iguaçu	Iguaçu	4	3.048,69	25
65035000	Porto Amazonas	Área de contribuição direta Iguaçu	Iguaçu	3	3.662,00	35
65020995	Montante Aterro Sanitário	Passaúna	Passaúna	2	14,60	29
65021770	Colônia Dom Pedro	Passaúna	Cachoeirinha	2	26,57	24
65004995	Ponte Pr 415	Piraquara	Piraquara	3	113,26	22
65010000	Fazendinha	Rio Pequeno	Pequeno	3	116,82	35
65015400	Cachoeira	Miringuava	Miringuava	3	271,60	27
65027000	Rodeio	Verde	Verde	3	258,49	34

*Classe de enquadramento do curso d'água definida na Resolução Coalier nº 04/2013.

Fonte: Adaptado de Comitê das Bacias do Alto Iguaçu e Afluentes do Alto Ribeira (2013).

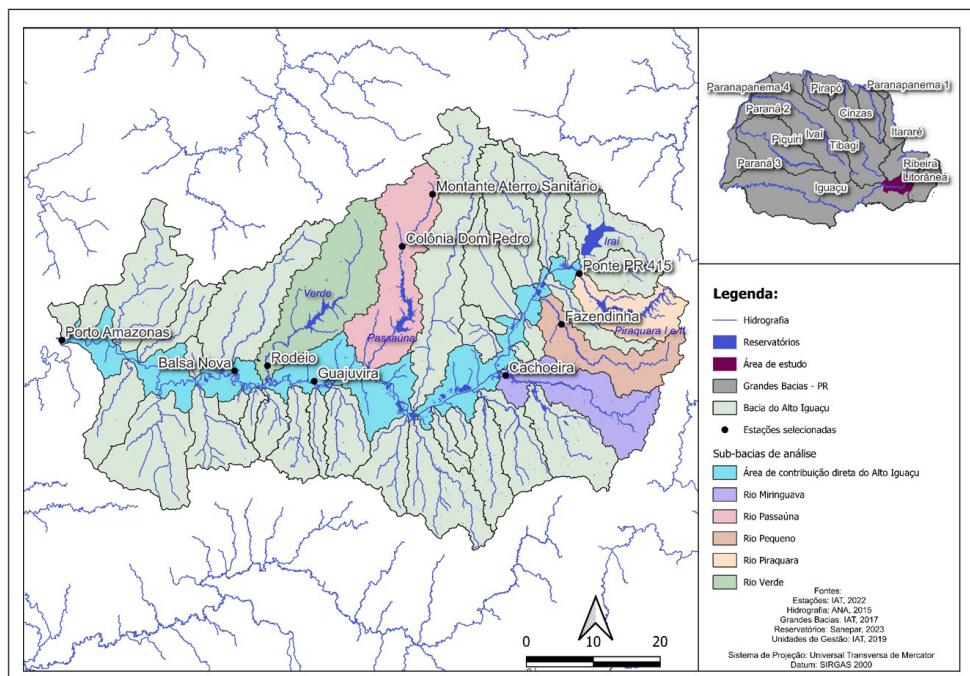


Figura 2 – A bacia hidrográfica de estudo e a identificação e localização das estações selecionadas.

Fonte: Adaptado de Instituto Água e Terra (2022).

Seleção dos Parâmetros

Almeida et al. (2023) utilizaram a Análise de Componentes Principais (*Principal Component Analysis – PCA*) para identificar os parâmetros mais representativos dos usos nesta bacia hidrográfica, destacando a DBO e a série de nutrientes (fósforo e nitrogênio) como os parâmetros químicos mais

relevantes para a caracterização da qualidade da água. Dessa forma, a seleção dos parâmetros de qualidade da água considerou a representação da matéria orgânica biodegradável e dos nutrientes, com base nos parâmetros monitorados e nos limites estabelecidos pela Resolução Conama nº 357/2005 para as respectivas classes de enquadramento.

A DBO, amplamente utilizada no controle de efluentes e na classificação de corpos hídricos conforme a legislação vigente (Brasil, 2005, 2011), também é recomendada pela Resolução Coaliar nº 04/2013 para a atualização do enquadramento da qualidade da água (Comitê das Bacias do Alto Iguaçu e Afluentes do Alto Ribeira, 2013) e representa a matéria orgânica biodegradável. Em relação à análise de nutrientes, os compostos de nitrogênio e fósforo foram os principais elementos avaliados, destacando-se o fósforo total como o mais relevante, identificado como fator limitante, conforme a relação N/P observada por Bianek (2023) na maioria dos pontos selecionados. Embora a Resolução Conama nº 357/2005 não defina limites para o nitrogênio total, ela regulamenta as concentrações de nitrogênio amoniacal. Contudo, Bianek (2023) observou que, nos pontos avaliados, o nitrogênio amoniacal não apresentou incompatibilidade com o enquadramento proposto, o que levou à priorização da análise do fósforo total.

As concentrações máximas adotadas para as análises foram os limites estabelecidos pela Resolução Conama nº 357/2005 para a classe de enquadramento (Brasil, 2005). A resolução mencionada não especifica limites de concentração para DBO e fósforo em rios de classe 4, limitando-se apenas às concentrações de oxigênio dissolvido (OD), fenóis totais e pH. Como esses parâmetros não foram avaliados neste estudo e, para fins de comparação e cálculo das reduções de carga, foi adotado um limite arbitrariamente definido para a classe 4, estabelecido com base na progressão aritmética de valores de DBO e fósforo das demais classes. As concentrações máximas adotadas estão apresentadas no Quadro 2.

Quadro 2 – Concentração máxima por classe de enquadramento

Parâmetro	Classe 2	Classe 3	Classe 4*
DBO	5 mg O ₂ /L	10 mg O ₂ /L	15 mg O ₂ /L
Fósforo	0,10 mg P/L	0,15 mg P/L	0,20 mg P/L

* Definido arbitrariamente com base na progressão aritmética dos valores das classes 2 e 3.

Fonte: Adaptado de Brasil (2005).

Complementarmente, para garantir a consistência das séries históricas de qualidade da água, nos casos em que o limite de detecção dos métodos de amostragem impediu uma avaliação mais precisa, foi atribuído o valor correspondente ao limite de detecção representando a concentração medida.

Elaboração das curvas de permanência de carga

O Conama define a capacidade de suporte de um corpo receptor como o valor máximo de poluentes que este corpo hídrico pode receber sem comprometer sua qualidade nem os usos estabelecidos pela classe de enquadramento (Brasil, 2011). Neste estudo, essa capacidade de suporte é representada pela carga máxima admissível, calculada com base na concentração limite definida pela Resolução Conama nº 357/2005 (Brasil, 2005), em consonância com a classe de enquadramento do trecho monitorado (Comitê das Bacias do Alto Iguaçu e Afluentes do Alto Ribeira, 2013), e na vazão associada a uma determinada probabilidade de excedência, obtida a partir da curva de permanência de vazão (Naghettini & Pinto, 2007).

A curva de permanência da carga máxima admissível foi, portanto, construída pela combinação entre a concentração limite definida pelo Conama e os dados históricos de vazão. Nessa análise, as maiores cargas admissíveis estão relacionadas a menores frequências de permanência, uma vez que essas correspondem a maiores vazões e, consequentemente, maior capacidade de diluição do rio. Por outro lado, menores cargas admissíveis estão associadas a maiores frequências de permanência, o que reflete a menor vazão e, portanto, a reduzida capacidade de assimilação de poluentes pelo rio (Serrano et al., 2020).

A carga máxima admissível ($Carga_{\mu\zeta}$) e a carga observada ($Carga_{\text{obs}}$) foram calculadas com os dados de vazão e qualidade conforme as Equações 1 e 2, respectivamente:

$$Carga_{\text{max}} = Q \times C_{\text{mx}} \times A_{\text{dren}} \times FC \quad (1)$$

$$Carga_{\text{obs}} = Q_{\text{obs}} \times C_{\text{obs}} \times A_{\text{dren}} \times FC \quad (2)$$

em que Q é a vazão obtida da curva de permanência de vazão da estação, em $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; $C_{\mu\zeta}$ é a concentração máxima permitida definida pelo Conama, para cada classe de enquadramento, em $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,

conforme o Quadro 1; $Q_{0\beta\sigma}$ é a vazão observada no dia em que a qualidade da água foi amostrada, em $m^3.s^{-1}$; A é a área de drenagem da bacia hidrográfica, em km^2 ; $C_{0\beta\sigma}$ é a concentração observada no dia em que a qualidade da água foi amostrada, em $mg.L^{-1}$ e; FC é um fator de conversão utilizado para converter a carga em $kg.d^{-1}$ (86,4).

Cleland (2003) propôs uma análise complementar à curva de permanência de carga ao sugerir a identificação de intervalos que servem como indicadores representativos das condições hidrológicas predominantes. Essa metodologia, quando associada a outros elementos de planejamento de bacias hidrográficas, permite um direcionamento mais preciso das discussões relativas às causas da poluição nos trechos monitorados, ALÉM de facilitar a proposição de soluções para os desafios ambientais enfrentados pela bacia hidrográfica (Cleland, 2003). Convencionalmente, a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (*United States Environmental Protection Agency* – USEPA) estabeleceu uma associação entre os intervalos de permanência de vazão e as condições hidrológicas, conforme apresentado na Figura 3 (United States Environmental Protection Agency, 2007). Nessa classificação, vazões altas ocorrem em intervalos de permanência de 0 a 10%, enquanto vazões mínimas são observadas entre 90 e 100%, refletindo as diferentes capacidades de diluição do corpo hídrico e fontes de cargas pontuais ou difusas em função da variabilidade das vazões.

Intervalo de permanência de vazões	Condições Hidrológicas
0 – 10%	Vazões altas
10 – 40%	Vazões de período úmido
40 – 60%	Vazões na faixa média
60 – 90%	Vazões de período seco
90 – 100%	Vazões mínimas

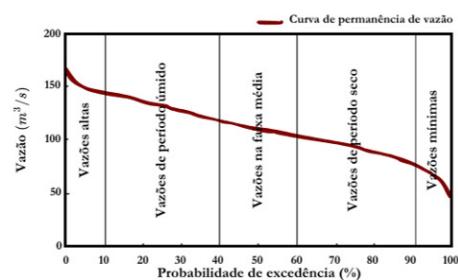


Figura 3 – Condições hidrológicas associadas aos intervalos de permanência da vazão.
Fonte: Adaptado de Cleland (2003) e United States Environmental Protection Agency (2007).

A não conformidade em condições de vazões mínimas sugere a presença de fontes pontuais de poluição, pois essas fontes mantêm uma entrada contínua e geralmente não apresentam grandes variações em relação ao regime de vazão. Por outro lado, a não conformidade em vazões altas evidencia o potencial de poluição por fontes difusas, associadas ao escoamento superficial decorrente de eventos de precipitação intensa, que transportam cargas de poluentes ao longo da bacia hidrográfica (Machado et al., 2019; United States Environmental Protection Agency, 2007; Cleland, 2003).

Para a análise detalhada da distribuição dos valores de carga pontual em cada condição hidrológica, foram elaborados diagramas de caixa (*box plot*) que ilustram a variação dos dados de carga observada em cada intervalo de permanência.

Redução de Carga

A capacidade de assimilação de cargas de um corpo hídrico está intrinsecamente ligada à vazão disponível, o que implica que a carga máxima admissível varia conforme as condições hidrológicas presentes. Desse modo, as reduções de carga necessárias para atender aos padrões de qualidade estabelecidos em cada trecho monitorado foram determinadas com base nos intervalos de permanência de vazões previamente definidos (vide Figura 3).

A análise da qualidade da água, com base em séries históricas, requer atenção a eventos atípicos e pontuais, os quais nem sempre refletem uma incompatibilidade contínua com os padrões estabelecidos para a classe do corpo hídrico. No contexto da gestão dos recursos hídricos, é fundamental considerar que nem todas as amostras da série histórica ou do período avaliado estarão consoantes aos limites regulamentares; entretanto, isso não implica que a qualidade do corpo hídrico esteja comprometida. Tal flexibilidade pode ser aplicada de maneira criteriosa, considerando que uma parcela pequena das amostras (por exemplo, 5%) ultrapasse os limites regulamentares, assegurando ainda a qualidade ambiental e a função ecossistêmica do corpo hídrico não sejam prejudicadas. Abordagens semelhantes são encontradas na literatura, como no estudo da USEPA, em colaboração com o Departamento de Saúde e Controle Ambiental da Carolina do Sul

(South Carolina Department of Health and Environmental Control – SCDHEC), que avaliou a carga de coliformes fecais na bacia hidrográfica do rio Pee Dee, utilizando o 90º percentil das concentrações observadas. Nesse estudo, foi determinado que no máximo 10% das amostras poderiam exceder o limite de 400 UFC/100 ml (South Carolina, 2005; United States Environmental Protection Agency, 2007). Outro exemplo correlato é a metodologia da ANA para avaliação da qualidade da água no contexto do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 6, que classifica a água como “boa” quando 80% dos parâmetros avaliados atendem aos limites da classe 2, conforme a Resolução Conama nº 357/2005 (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2019).

Adicionalmente, a ANA vem destacando a necessidade de adaptações a cenários mais dinâmicos e à avaliação de riscos no gerenciamento dos recursos hídricos, considerando os desafios impostos pelas mudanças climáticas. Entre as diretrizes propostas para enfrentar esses desafios, a instituição argumenta que a adoção de uma única vazão de referência como base para o enquadramento pode restringir o processo de gestão, uma vez que as metas de qualidade baseadas em vazões restritivas aumentam os custos das medidas necessárias para seu cumprimento e dificultam a adaptação a cenários climáticos futuros incertos (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2016). Como alternativa, a Agência sugere trabalhar com probabilidades de ocorrência dos parâmetros de qualidade da água, o que permite um risco controlado de não atendimento ao enquadramento e oferece maior flexibilidade na gestão, especialmente diante de incertezas climáticas e hidrológicas (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2016). Bianek (2023), em estudo correlato, avaliou um cenário alternativo de 80% de conformidade, conforme Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2019), comparando ambos os critérios e destacando os pontos mais críticos para a conservação da qualidade da água.

Essa abordagem, ao considerar diferentes cenários e a variabilidade das condições hidrológicas, possibilita um planejamento mais robusto e adaptável, contribuindo para a sustentabilidade da gestão dos recursos hídricos a longo prazo. Além disso, a aplicação de metodologias probabilísticas para a avaliação da qualidade da água proporciona uma análise mais dinâmica, permitindo que os gestores respondam de forma eficaz às mudanças nas condições ambientais sem comprometer os objetivos de conservação e uso dos corpos hídricos.

Isto posto, este estudo adotou um critério mais conservador que a ANA, estabelecendo que 90% das amostras devem atender aos parâmetros de qualidade da classe vigente para que o trecho monitorado seja considerado compatível com seu enquadramento. A metodologia empregada para o cálculo da carga média em cada intervalo de permanência fundamenta-se na multiplicação da vazão correspondente ao percentil médio da condição hidrológica pelo 90º percentil das concentrações observadas para a respectiva condição hidrológica (Equação 3). Reconhecendo as incertezas dos dados de concentração e vazão monitorados e, uma vez estabelecidos regimes de vazões que selecionam intervalos de percentis de vazões, o cálculo de cargas nestes regimes é baseada em vazões e concentrações características nestes regimes. Para esta etapa optou-se por utilizar o procedimento adotada por United States Environmental Protection Agency (2007). A redução de carga necessária foi estimada como a diferença entre a carga total observada e a carga admissível, conforme definido pelas equações

$$Carga_{md.obs(int)} = Q_{md(int)} \times C_{obsP\%(int)} \quad (3)$$

$$Redução = Carga_{md.obs(int)} - Carga_{mx.P50(int)} \quad (4)$$

em que $Carga_{\mu\delta\beta\sigma(ivt)}$ é carga média observada no intervalo; $Q_{\mu\delta(ivt)}$ é a vazão média do intervalo; $C_{\mu\delta\beta\sigma\%P(ivt)}$ é a concentração média observada em P% naquele intervalo e; $Carga_{\mu\delta\beta\sigma(ivt)}$ é a carga máxima admitida na vazão associada ao percentil médio daquele intervalo.

Caso a carga admissível seja superior à observada, não há necessidade de redução, indicando que o trecho do rio se encontra dentro dos padrões de classe. Entretanto, se a carga observada exceder a admissível, a redução necessária é calculada e pode ser expressa tanto em termos de carga absoluta (kg dia^{-1}) para indicar o esforço de ação em cada bacia hidrográfica, normalizada pela área de drenagem (carga relativa, em $\text{kg.km}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) para fins de comparação entre bacias hidrográficas, ou como um percentual de redução necessária para indicar a gravidade do problema.

Por exemplo, para o intervalo de permanência de vazões entre 60% e 90% (vazões características de período seco), a carga representativa é obtida multiplicando-se a vazão do 75º percentil das vazões pelo 90º percentil das concentrações observadas nesse regime. A redução necessária é obtida ao subtrair essa carga da carga máxima permitida correspondente ao 75º percentil das vazões, como ilustrado na Figura 4.

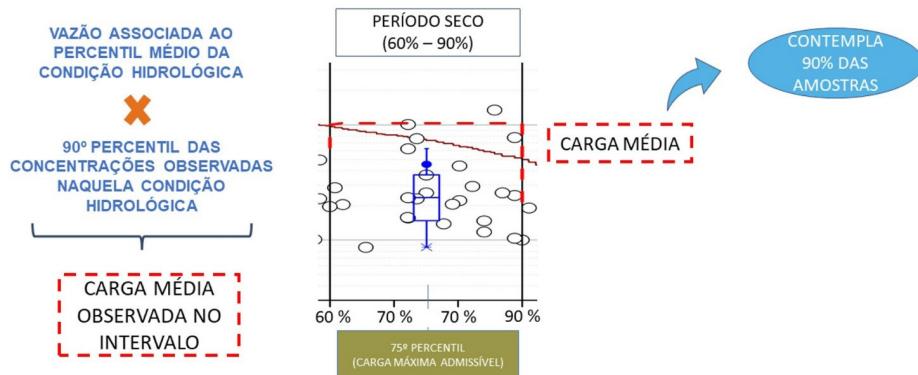


Figura 4 – Obtenção da redução de carga no intervalo de permanência de vazões entre 60 e 90% (Vazões de período seco).

Fonte: Adaptado de United States Environmental Protection Agency (2007).

Os resultados são apresentados por meio de uma curva de permanência de carga, que combina dados de monitoramento de vazões com a curva de carga máxima admissível, permitindo avaliar a qualidade do corpo hídrico em relação ao regime hidrológico e determinar a necessidade de redução de carga em cada condição hidrológica. Desta forma, a metodologia, os dados e os resultados são consolidados em uma única figura por estação, que, embora não seja a forma mais usual de apresentação, oferece maior riqueza de informações. Na Figura 5 estão indicados os principais aspectos a serem observados na curva de permanência de carga deste estudo

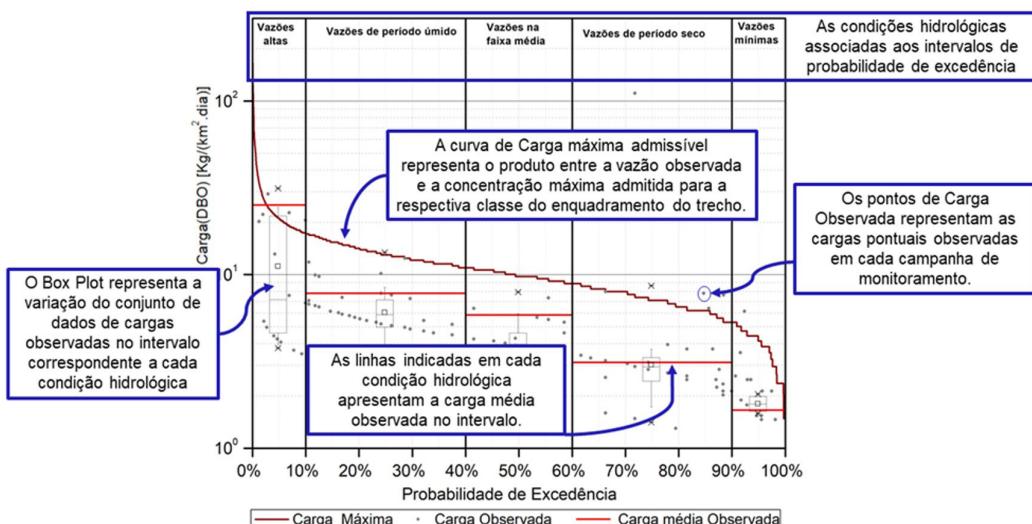


Figura 5 – Componentes da figura de apresentação dos resultados. Contempla as curvas de permanência de carga máxima admissível e a carga média observada. As cargas observadas individuais exprimem a representatividade de medições em cada condição hidrológica, juntamente à síntese dos dados amostrais representados pelo diagrama box-plot.

Fonte: Adaptado de Bianek (2023).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Análise de carga Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)

Na Figura 6, são apresentadas as curvas de permanência de carga, que sintetizam as cargas observadas e a carga máxima admissível para o parâmetro DBO em cada estação. A partir disso, é possível visualizar e avaliar o cumprimento ou a extração dos limites em diferentes condições hidrológicas. Os indicadores de redução orientam sobre a necessidade de redução quantitativa, permitindo a comparação entre os locais mais críticos da bacia hidrográfica. Na Tabela 1, estão indicadas as reduções de carga necessárias

para cada estação, para carga relativa ($\text{kg} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$) e absoluta ($\text{kg} \cdot \text{dia}^{-1}$). Para uma análise espacial e integrada, as reduções de carga relativa e expressas em termos percentuais, foram representadas em mapas temáticos para cada condição hidrológica, conforme indicado na Figura 7.

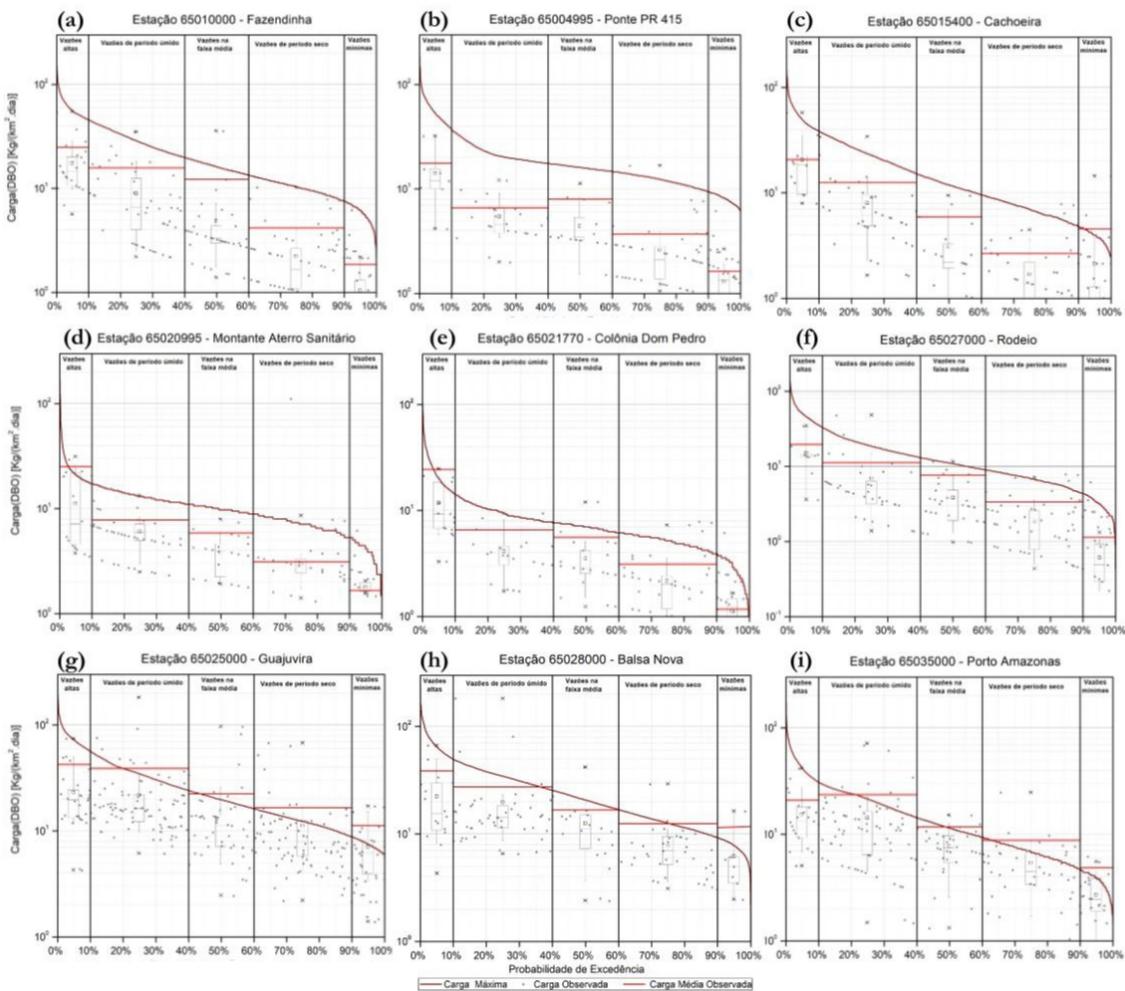


Figura 6 – Comparação entre a Carga Observada e a Carga Máxima Admissível para o parâmetro DBO. Estações: Fazendinha (a), Ponte PR 415 (b), Cachoeira (c), Montante Aterro Sanitário (d), Colônia Dom Pedro (e), Rodeio (f), Guajuvira (g), Balsa Nova (h) e Porto Amazonas (i).

As estações **Fazendinha** (Figura 6a), **Ponte PR 415** (Figura 6b) e **Rodeio** (Figura 6f), situadas em trechos classificados como Classe 3 – água doce, estão em conformidade com o enquadramento para todas as condições hidrológicas. As estações Ponte PR 415 e Rodeio estão localizadas a jusante de reservatórios de abastecimento (Reservatórios Piraquara I e II e Reservatório Verde, respectivamente), logo se espera uma melhor qualidade da água. Na estação Rodeio, a carga média observada está mais próxima da curva de carga máxima admissível em comparação com as demais estações mencionadas.

As estações **Montante Aterro Sanitário** (Figura 6d) e **Colônia Dom Pedro** (Figura 6e), ambas localizadas a montante do Reservatório Passaúna em trechos de Classe 2, apresentaram cargas superiores ao limite máximo admissível para essa classe durante a condição hidrológica de vazões altas (0–10%), com reduções necessárias de 18% e 17% (Figura 7), respectivamente, resultando em uma redução de cargas médias de $115 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ e $61 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ (Tabela 1). O aumento das cargas nas condições de vazões altas indica possivelmente que as principais fontes são contribuições difusas, associadas a eventos de escoamento superficial. Entre os anos 1990 e 2017, a bacia hidrográfica do rio Passaúna passou por significativas alterações no uso e ocupação do solo, com redução das áreas de vegetação e aumento de áreas com baixa permeabilidade, como solos expostos e áreas urbanas (Drummond et al., 2019). Esse processo intensificou a poluição difusa, especialmente em áreas próximas às nascentes, como as estações Montante Aterro Sanitário e Jusante Aterro Sanitário, onde o aumento de solo exposto reforça a relação entre a degradação da qualidade da água e o carreamento de poluentes por escoamento superficial (Drummond, 2020; Bianek & Mannich,

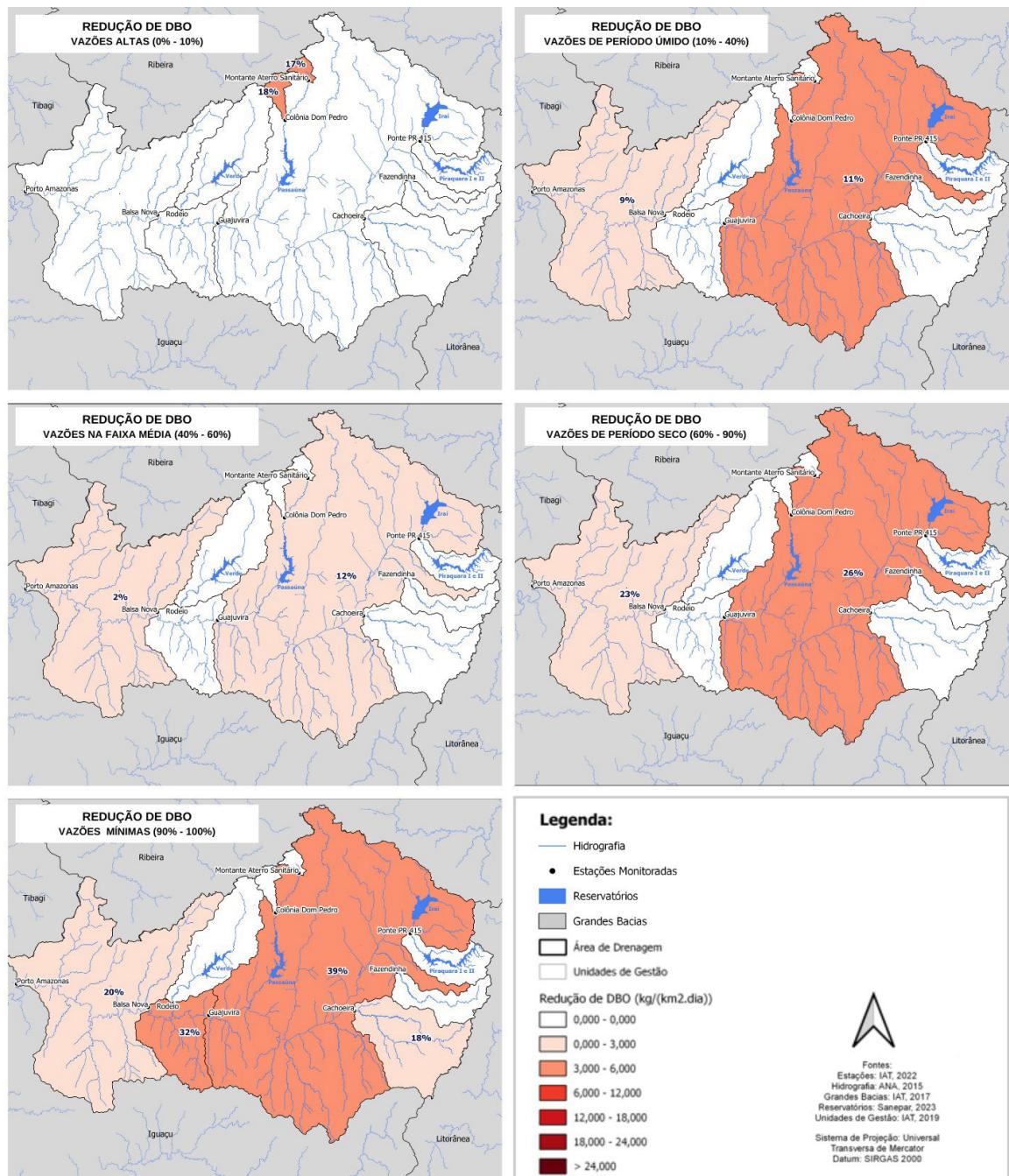


Figura 7 – Reduções de carga de DBO para as áreas de contribuição de cada estação, de acordo com as condições hidrológicas.

2021). Drummond (2020) identificou que chuvas intensas na bacia hidrográfica do rio Passaúna intensificam o carreamento de poluentes, elevando significativamente a concentração de compostos como o zinco, cujos níveis chegaram a ser até cinco vezes superiores após eventos de precipitação intensa. Desta forma recomendando a realização de estudos adicionais para caracterizar esse fenômeno e identificar a origem específica dos poluentes na bacia hidrográfica, considerando os processos de escoamento e as áreas de contribuição. A United States Environmental Protection Agency (2007) destaca que a análise da qualidade da água por meio das curvas de permanência de carga pode ser aprimorada para caracterizar o comportamento dos parâmetros avaliados após eventos de chuva. A comparação entre a vazão no dia da coleta e nos dias anteriores permite inferir a influência do escoamento superficial. Qualquer aumento de vazão acima de um limite mínimo pré-estabelecido pode ser atribuído à precipitação, exceto em casos de controle por reservatórios a montante (United States Environmental Protection Agency, 2007). Essa abordagem permite correlacionar eventos de precipitação com desvios em relação aos padrões de enquadramento, oferecendo uma alternativa para avaliar, em estudos posteriores, quais parâmetros são diretamente afetados pelo não

atendimento do enquadramento devido aos eventos de precipitação específicos na bacia hidrográfica.

A estação **Cachoeira** (Figura 6c), localizada no rio Miringuava (Classe 3), requer uma redução de 18% da carga poluente durante vazões mínimas (90–100%) (Figura 7), o que equivale a 219 kg.d^{-1} (Tabela 1). Em condições de menor escoamento, quando a capacidade de assimilação do rio diminui, o aumento das cargas está predominantemente associado a fontes pontuais de poluição. Em geral, a qualidade da água observada nessa seção atende ao enquadramento, no entanto, em situações de escassez hídrica, é provável que ocorra um comprometimento na qualidade da água. De acordo com o estudo realizado no âmbito da criação da Área de Proteção Ambiental (APA) do Miringuava, que inclui o Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE) e o Plano de Uso e Conservação das Águas e Entorno do Reservatório para Abastecimento Público do Miringuava (Pacuera), as análises de 2019 não identificaram valores de DBO acima dos limites legais na área de influência do Pacuera (Companhia de Saneamento do Paraná, 2020), a montante da estação Cachoeira. Isso dá indícios de que o aporte excedente de DBO ocorre a jusante da área de construção do reservatório.

A estação **Guajuvira** (Figura 6g), localizada em um trecho de Classe 4 no rio Iguaçu, excede o limite de DBO estabelecido neste estudo (15 mg.L^{-1}) em todas as condições hidrológicas, exceto durante vazões altas. A redução percentual necessária é proporcional à diminuição das vazões, com reduções necessárias de 11%, 12%, 26% e 39% para as condições vazões de período úmido, vazões na faixa média, vazões de período seco e vazões mínimas, respectivamente (Figura 7). Embora haja recomendação para a redução de cargas, não é coerente afirmar que a qualidade da água esteja incompatível com o enquadramento, pois não existe um limite para o parâmetro DBO na Classe 4. Esse segmento reflete a funcionalidade da Classe 4, definida durante o enquadramento das bacias do Alto Iguaçu e afluentes do Alto Ribeira, quando os dados sobre cargas poluidoras eram insuficientes e o cenário base considerava apenas as cargas do setor de saneamento, estruturadas com base nas estimativas populacionais e atendimento por infraestrutura sanitária (Paraná, 2013). Para validar a extração do padrão da classe de uso, seria necessário avaliar o OD, parâmetro que já foi analisado em estudos anteriores, como o de Leithold et al. (2017), que identificaram concentrações de OD próximas de zero na região, indicando alta deterioração da qualidade da água neste trecho. A área de drenagem da estação Guajuvira é densamente urbanizada, tendo como principais usos a assimilação de efluentes sanitários e industriais (Paraná, 2007b, 2013; Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social, 2017; Stefan & Fernandes, 2020; Almeida et al., 2023). Este é um dos trechos mais críticos da bacia do Alto Iguaçu, o que reforça a necessidade de medidas de controle e planejamento para prevenir a deterioração da qualidade da água e preservar suas funções ambientais e paisagísticas, tanto neste segmento quanto a jusante.

Na estação **Balsa Nova** (Figura 6h) localizada a jusante e classificada como classe 4, os valores permaneceram dentro dos limites estabelecidos para todas as condições hidrológicas. Observa-se que, entre esses pontos de monitoramento, há um aumento da vazão, devido ao aumento da área de drenagem, e pela contribuição de afluentes importantes, como o rio Verde, que traz águas menos poluídas e contribui para a diluição das cargas provenientes de Guajuvira. Além disso, o processo natural de autodepuração do corpo hídrico também contribui para a melhoria da qualidade da água nesse trecho, conforme identificado em estudos anteriores (Leithold et al., 2017). A recuperação da qualidade da água, desde Balsa Nova até União da Vitória, foi igualmente observada por Leithold et al. (2017), que atribuem essa melhoria às características da região, predominantemente rural, marcada por atividades agrícolas, pecuária, remanescentes florestais e pelo menor aporte de efluentes antrópicos. De acordo com Leithold et al. (2017), o efeito de diluição das cargas poluidoras também desempenha um papel importante, resultando na melhoria da qualidade da água, especialmente na recuperação da concentração de OD.

A estação **Porto Amazonas** (Figura 6i), localizada no rio Iguaçu em trecho de Classe 3, requer reduções de carga poluente em todas as condições hidrológicas, exceto durante as vazões altas. As maiores reduções são necessárias durante as vazões de período seco (23%) e mínimas (20%) (Figura 7), indicando que as principais fontes de poluição na área de drenagem são pontuais. Embora os percentuais de redução em Porto Amazonas sejam semelhantes aos da estação Guajuvira, o limite de carga admissível é menor devido à Classe 3. Isso resulta em reduções de carga até 11 vezes menores em Porto Amazonas durante as vazões médias, o que corresponde, em termos absolutos, a uma diminuição de $6.178,81 \text{ kg.dia}^{-1}$ na carga poluente para essa condição. Assim, a carga recebida a montante impacta diretamente a qualidade da água na estação Porto Amazonas. Este é um exemplo claro de como o controle das cargas a montante pode afetar o atendimento ao enquadramento a jusante, destacando a importância da integralidade das ações e do controle efetivo do instrumento de enquadramento. Além disso, a análise de limites intermediários, como o estabelecido para a classe 4 neste estudo, mostra-se útil para compreender a dinâmica dos poluentes na bacia hidrográfica.

Tabela 1 – Reduções de carga relativa (em $\text{kg} \cdot \text{km}^2 \cdot \text{dia}^{-1}$), seguidas, entre parêntesis, pela carga absoluta (em $\text{kg} \cdot \text{dia}^{-1}$), para o parâmetro DBO. As estações Balsa Nova, Ponte PR 415, Fazendinha e Rodeio não indicaram redução de carga necessária.

Nome da Estação	Vazões Altas	Período úmido		Média	Período Seco	Vazões Mínimas
		(0 - 10%)	(10 - 40%)			
Guajuvira	-	4,318	2,726	4,305	4,396	
	-	(11.131,60)	(7.025,88)	(11.096,87)	(11.331,36)	
Balsa Nova	-	-	-	-	3,72	
	-	-	-	-	(1.1340,52)	
Porto Amazonas	-	2,147	0,231	2,028	0,967	
	-	(7.862,40)	(847,07)	(7.426,08)	(3.542,40)	
Montante Aterro Sanitário	4,202	-	-	-	-	
	(61,34)	-	-	-	-	
Colônia Dom Pedro	4,355	-	-	-	-	
	(115,71)	-	-	-	-	
Cachoeira	-	-	-	-	0,809	
	-	-	-	-	(219,802)	

A análise das estações localizadas na área de influência do Rio Iguaçu (Guajuvira, Balsa Nova e Porto Amazonas) revela um comprometimento da qualidade da água ao longo do trecho, exigindo atenção especial. O contraste entre as estações de monitoramento destaca a necessidade de reavaliar as estratégias de gestão de carga a montante da estação Guajuvira, identificando fontes de poluição e implementando melhorias na qualidade da água nessa região, que podem tornar mais efetivo o atendimento nos pontos a montante. Estudos da região destacam o processo de industrialização nas últimas décadas, com os principais usos voltados ao abastecimento público e à indústria, concentrados em áreas densamente urbanizadas (Leithold et al., 2017; Stefan & Fernandes, 2020; Almeida et al., 2023). Segundo Stefan & Fernandes (2020), as cargas de DBO não são completamente assimiladas nesses locais, indicando que as concentrações de material orgânico dos efluentes liberados a montante não são totalmente absorvidas. A estação Guajuvira, além de apresentar as maiores necessidades de redução de carga poluente (11%, 12%, 26% e 39% para as condições de vazões de período úmido, vazões médias, período seco e vazões mínimas, respectivamente, como pode ser observado na Figura 7), também possui as maiores contribuições per capita ($1,3 \text{ g} \cdot \text{hab}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ para vazões médias, entre 40% e 60%). Esses dados reforçam a necessidade de priorizar as ações de despoluição na área de drenagem dessa estação, com o objetivo de melhorar a qualidade da água nos pontos a jusante.

Análise da carga de Fósforo

Assim como na análise da DBO, na Figura 8 são apresentadas as curvas de permanência de carga, que sintetizam as cargas observadas e a carga máxima admissível para o parâmetro fósforo em cada estação. Na Tabela 2, são indicadas as reduções de carga necessárias para cada estação, em termos relativos ($\text{kg} \cdot \text{km}^2 \cdot \text{dia}^{-1}$) e absolutos ($\text{kg} \cdot \text{dia}^{-1}$). As reduções de carga relativa e expressas em termos percentuais foram representadas em mapas temáticos para cada condição hidrológica na Figura 9.

Nos trechos monitorados pelas estações **Fazendinha** (Figura 8a) e **Montante Aterro Sanitário** (Figura 8d), o fósforo está em conformidade com os limites estabelecidos pelo enquadramento nas Classes 3 e 2, respectivamente, em todos os intervalos de permanência de vazões.

Para a estação **Colônia Dom Pedro** (Figura 8e), as cargas de fósforo excedem o limite máximo admissível em condições hidrológicas associadas a permanências menores (0-40%), indicando a necessidade de reduzir as cargas em 49% durante vazões altas (0-10%) e 26% nas vazões de período úmido (10-40%) (Figura 9). A DBO também apresentou comportamento similar nesta estação, com a incompatibilidade com o enquadramento observada nas vazões altas (0-10%). Segundo a análise de Cleland (2003), que relaciona condições hidrológicas às fontes de poluição, a extração dos limites de poluentes em vazões altas indica a influência de fontes difusas, associadas principalmente ao escoamento superficial. Essa relação corrobora a análise realizada para fósforo e DBO na área em questão. Estudos na sub-bacia do rio Passaúna reforçam essa tendência, demonstrando que o aumento das vazões elevou as

Tabela 2 – Reduções de carga relativa (em $\text{kg} \cdot \text{km}^2 \cdot \text{dia}^{-1}$), seguidas, entre parêntesis, pela carga absoluta (em $\text{kg} \cdot \text{dia}^{-1}$), para o parâmetro fósforo. As estações Montante Aterro Sanitário e Fazendinha não indicaram redução de carga necessária.

Nome da Estação	Vazões Altas	Período úmido	Média	Período Seco	Vazões Mínimas
	(0 - 10%)	(10 - 40%)	(40 - 60%)	(60 - 90%)	(90 - 100%)
Guajuvira	2,52	1,07	1,7	0,77	0,48
	(6.486,75)	(2.752,79)	(4.392,47)	(1.996,81)	(1.236,73)
Balsa Nova	1,63	0,82	0,79	0,86	0,72
	(4.974,76)	(2.506,05)	(2.422,40)	(2.616,75)	(2.202,58)
Porto Amazonas	0,08	0,85	1,09	0,52	0,29
	(290,89)	(3.097,79)	(3.981,21)	(1.888,70)	(1.076,89)
Colônia Dom Pedro	0,39	0,07	-	-	-
	(10,29)	(1,80)	-	-	-
Ponte PR 415	-	-	-	0,85	-
	-	-	-	(96,58)	-
Cachoeira	0,23	0,14	0,06	0,01	0,08
	(63,59)	(37,81)	(17,08)	(1,59)	(22,25)
Rodeio	-	-	0,1	0,03	0,13
	-	-	(27,15)	(9,49)	(33,99)

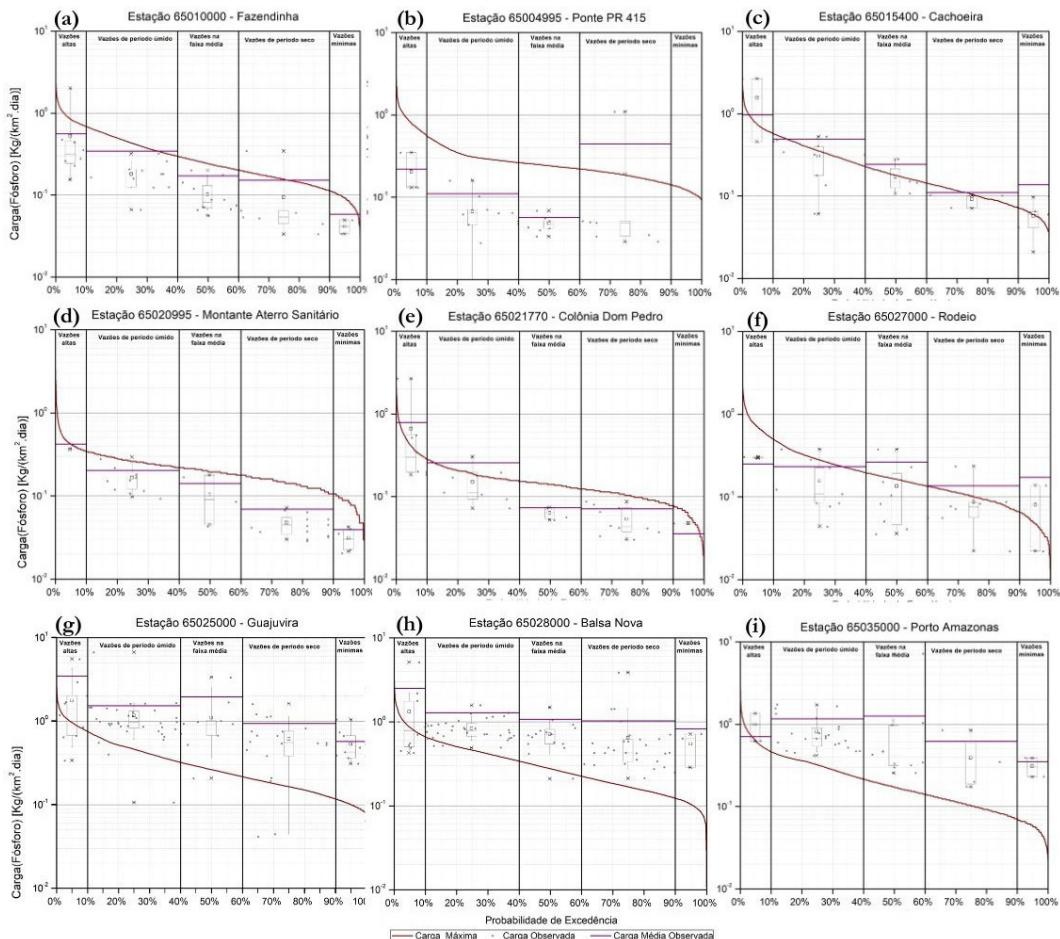


Figura 8 – Comparação entre a Carga Observada e a Carga Máxima Admissível para o parâmetro Fósforo. Estações: Fazendinha (a), Ponte PR 415 (b), Cachoeira (c), Montante Aterro Sanitário (d), Colônia Dom Pedro (e), Rodeio (f), Guajuvira (g), Balsa Nova (h) e Porto Amazonas (i).

concentrações de fósforo, o que sugere a necessidade de análises adicionais para avaliar sua relação com vazões superiores ao escoamento base (Drummond et al., 2019; Bianek & Mannich, 2021; Bonamigo et al., 2021). De maneira geral, é possível aferir que as ações de mitigação nessa área devem se concentrar no controle da poluição difusa. Ademais, a presença do reservatório Passaúna a jusante requer atenção especial, uma vez que, durante eventos de precipitação e vazões elevadas, o aporte de fósforo pode ser significativo, potencializando a proliferação de algas e eutrofização, o que compromete o abastecimento.

Na estação **Ponte PR 415** (Figura 9b), situada no rio Piraquara, identificou-se uma incompatibilidade com o enquadramento nas vazões de período seco (60-90%), necessitando de uma redução significativa de 82% para atender à classe 3 (Figura 9), totalizando uma carga de 96,58 kg.dia⁻¹ (Tabela 2). A análise da série histórica da estação não apresenta medições do parâmetro fósforo nas condições de vazões mínimas (90-100%), portanto, não há proposta de redução para esse intervalo. A estação Ponte PR 415 está localizada a jusante dos Reservatórios Piraquara I e II, o que exige atenção redobrada ao parâmetro fósforo. O estudo de Bittencourt & Gobbi (2006) apontou que o reservatório Piraquara II tem alto potencial de eutrofização, com carga de fósforo resultante do uso agrícola e apresentando baixa profundidade do corpo d'água. Contudo, faltam informações detalhadas para determinar se o fósforo observado no ponto monitorado se origina a montante do reservatório ou de uma fonte entre o reservatório e a estação de monitoramento. Conforme a análise sugerida por Cleland (2003), a origem do fósforo seria majoritariamente pontual, uma vez que é detectado em condições de vazões menores. No entanto, o regime de regularização do próprio reservatório pode mascarar este efeito como similar ao de fontes pontuais.

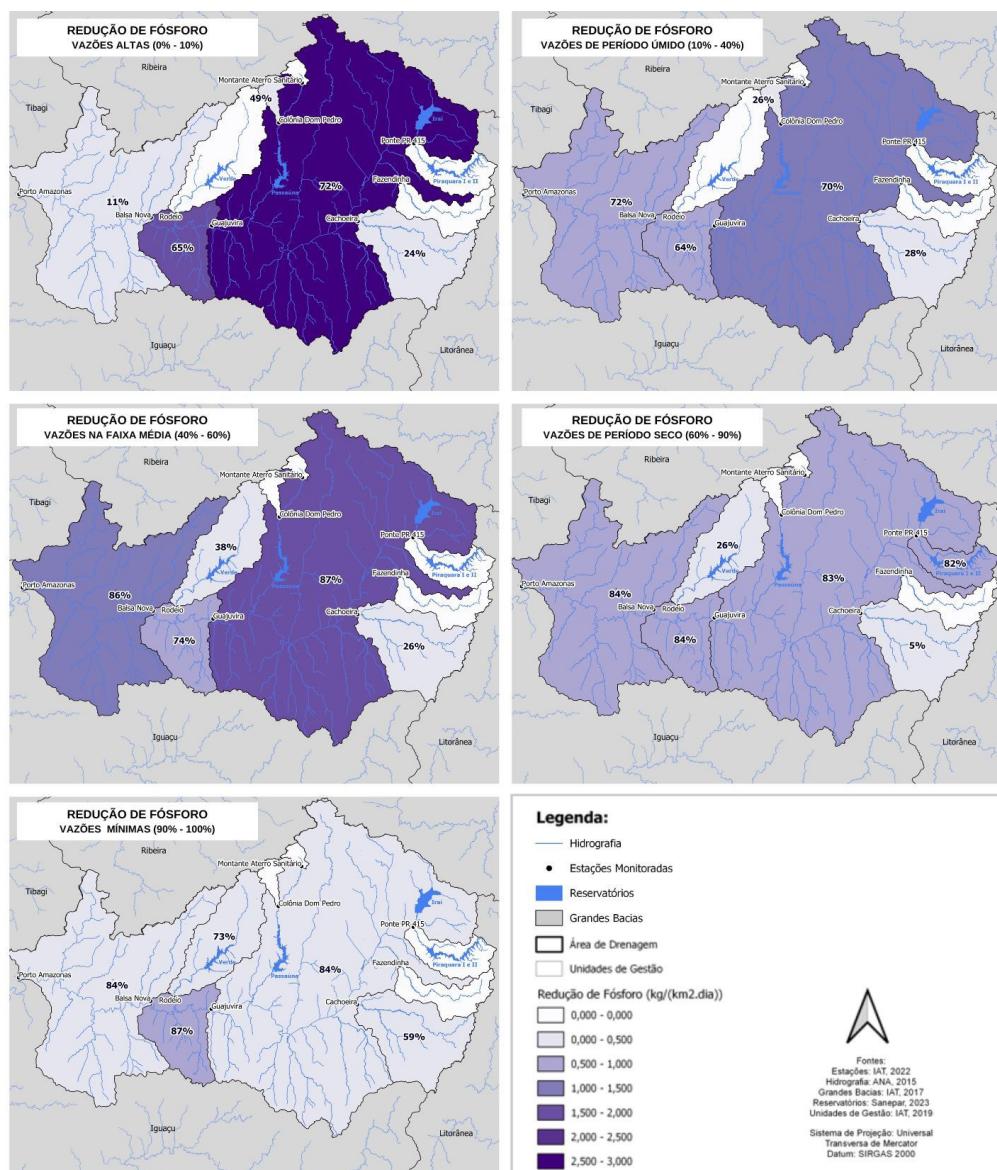


Figura 9 – Reduções de carga de Fósforo para as áreas de contribuição de cada estação, de acordo com as condições hidrológicas.

Na estação **Cachoeira** (Figura 8c), que monitora o rio Miringuava, foi identificada incompatibilidade com a classe 3 em todas as condições hidrológicas. As cargas médias de fósforo observadas estão ligeiramente acima do limite permitido, com a maior diferença registrada nas vazões máximas, atingindo 63 kg.d⁻¹ (Tabela 2). A sub-bacia do rio Miringuava é predominantemente rural, com propriedades voltadas para a agricultura e pecuária, destacando-se o cultivo de hortaliças, grãos e a produção de leite. Os produtores de hortaliças representam aproximadamente 9% da produção do Paraná, apesar da área reduzida (Paraná, 2023; Companhia de Saneamento do Paraná, 2020). A porção mais urbanizada da sub-bacia localiza-se após a ponte da rodovia BR-376, mais próxima à estação Cachoeira. A sub-bacia também é um dos mananciais de abastecimento da RMC, com um ponto de captação de água a montante da estação. Em 2015, a Sanepar iniciou a construção da Barragem do Miringuava para ampliar o fornecimento de água e equilibrar os sistemas integrados na Região Metropolitana de Curitiba (Santos, 2023; Companhia de Saneamento do Paraná, 2013). Na área de influência da barragem, foram identificadas concentrações acima dos limites legais para parâmetros associados ao uso de agrotóxicos, como ferro, manganês e alumínio, em monitoramento iniciado em 2013 e atualizado em 2019 (Companhia de Saneamento do Paraná, 2020). Em 2019, também foram observadas extrações dos limites para fósforo, turbidez, demanda química de oxigênio (DQO) e *Escherichia coli* (Companhia de Saneamento do Paraná, 2020). Em 2023, contaminantes emergentes foram detectados nas áreas que serão submersas com o enchimento da barragem (Constantino et al., 2025). Esses dados mostram que fósforo e outros contaminantes já estão presentes a montante da estação Cachoeira, na região rural. As práticas agrícolas, especialmente o uso de fertilizantes, intensificam o aporte de fósforo e outros contaminantes aos cursos d'água, especialmente durante períodos de maior escoamento superficial, contribuindo para a extração dos limites de fósforo na sub-bacia. Assim, é crucial adotar medidas para controlar as fontes de fósforo, principalmente as que afluem ao reservatório, garantindo sua operação adequada e a preservação ambiental.

Na estação **Rodeio** (Figura 8f), as cargas médias observadas excedem a carga máxima admissível em diferentes intervalos de permanência de vazões, com variações de 40% a 100%. Para atender aos limites, seriam necessárias reduções de 38% nas vazões médias, 26% em períodos secos e 73% nas vazões mínimas (Figura 9). As maiores reduções ocorrem nas vazões mínimas (cerca de 34 kg.d⁻¹, vide Tabela 2), sugerindo que o aporte de fósforo pode estar associado a um lançamento contínuo e pontual, enquanto a assimilação do nutriente no corpo hídrico é influenciada pela redução das vazões. Essa estação também está localizada a jusante de um reservatório (Reservatório Verde), utilizado de forma compartilhada para abastecimento e uso industrial. A situação é semelhante à observada na estação Ponte PR 415, onde a origem pontual do fósforo em vazões mínimas pode estar sendo mascarada pelo efeito do reservatório. Embora Carneiro et. al. (2014) indiquem que o reservatório Verde atua como uma barreira física à saída de fósforo, o estudo também relata que, à época, a descarga total de fósforo das sub-bacias do rio Verde era de aproximadamente 6 kg.dia⁻¹. Considerando que esse levantamento foi realizado há mais de dez anos, é possível que o aporte de fósforo tenha se intensificado, especialmente diante de possíveis mudanças no uso e ocupação do solo, no crescimento populacional, no aumento das atividades industriais e agrícolas na região, bem como a distribuição das fontes pontuais e difusas.

Na estação **Guajuvira** (Figura 8g), a carga média observada de fósforo ultrapassa a carga máxima admissível estabelecida no estudo em todas as condições hidrológicas. As cargas diárias a serem reduzidas variam de 6.486 kg.d⁻¹ em vazões altas a 1.236 kg.d⁻¹ em vazões mínimas. No entanto, a incompatibilidade com o enquadramento não ocorre apenas nas condições de vazões altas. Embora essas condições exijam a maior redução da carga, o comprometimento dos padrões de fósforo é observado de maneira generalizada em todas as condições hidrológicas, sugerindo que o problema é complexo e está majoritariamente relacionado a fontes pontuais com ampla influência das fontes difusas. A área de drenagem da estação Guajuvira, que abrange a maior parte da mancha urbana da RMC, abriga cerca de 97% da população da bacia hidrográfica do Alto Iguaçu e quase 80% da população da RMC. Ou seja, além de apresentar as maiores reduções de fósforo, também registra as maiores reduções per capita. Localizada a jusante de várias ETEs, essa área é impactada por diversas fontes de poluição, principalmente efluentes industriais e domésticos, além de resíduos provenientes de aterros (Stefan & Fernandes, 2020). Esses lançamentos resultam em um aporte significativo de fósforo e outros poluentes, como a DBO, identificados neste estudo e em pesquisas anteriores (Bianek, 2023; Stefan & Fernandes, 2020; Leithold et al., 2017), além de contaminantes emergentes, conforme apontado por Mizukawa et al. (2019).

A jusante da estação Guajuvira, na estação **Balsa Nova** (Figura 8h), em um trecho classe 4, a carga de fósforo também ultrapassa o limite máximo estabelecido em todas as condições hidrológicas (Figura 9). As reduções diárias observadas são menores que as da estação Guajuvira, sendo a maior delas ocorrendo em vazões altas, totalizando 4.974,76 kg.d⁻¹ (Tabela 2). Já na estação **Porto Amazonas** (Figura 8i), em

trecho classe 3, a qualidade da água em relação ao fósforo é pior, com cargas médias significativamente acima do limite admissível. As maiores reduções nesta estação ocorrem nas vazões médias (cerca de 86%, vide Figura 9), com uma diminuição 3.981 kg.d^{-1} (Tabela 2).

Assim como na avaliação da DBO, o trecho mais crítico identificado é a calha principal do Rio Iguaçu, especialmente a partir da estação Guajuvira, onde a área de drenagem demanda as maiores reduções de carga de fósforo, neste caso, principalmente em vazões altas.

Outra tendência observada foi a possível influência dos reservatórios nos aportes de fósforo, com concentrações elevadas identificadas a jusante dos Reservatórios Verde, na Estação Rodeio, e Piraquara I e II, na Estação Ponte PR 415. Devido à regularização da vazão, os reservatórios podem mascarar os efeitos de cargas difusas à montante e produzir um sinal mais característico de fontes pontuais contínuas, cuja averiguação transcende aos objetivos deste estudo.

A estação Guajuvira, embora seja o ponto mais crítico identificado no estudo para DBO e fósforo, é classificada como de boa qualidade pelo Índice de Qualidade da Água (IQA), conforme o portal de Monitoramento da Qualidade da Água no Estado do Paraná (Instituto Água e Terra, 2025), consultado em 2025. O IQA é amplamente utilizado na avaliação da qualidade da água, sendo adotado por órgãos gestores como a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (Cetesb) e o IAT no Paraná. No entanto, considerar unicamente este índice na avaliação da qualidade da água de uma bacia hidrográfica pode gerar vieses, uma vez que os pesos atribuídos a cada parâmetro foram definidos com base em uma pesquisa de opinião com especialistas (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2019; Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2022), o que pode comprometer a representatividade dos resultados em relação às fontes específicas de poluição. Embora o índice seja eficaz para avaliar o lançamento de efluentes industriais, domésticos e outras fontes difusas de poluição frequentemente associadas a rios urbanos (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2022), não demonstrou a mesma eficácia na avaliação da qualidade da água na estação Guajuvira, por exemplo. A agregação dos dados pode ter resultado na perda de informações sobre variáveis individuais e suas interações, uma limitação já reconhecida pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (2019) em relação ao uso do índice.

Para uma gestão mais precisa, é recomendável complementar a análise com parâmetros específicos da poluição da bacia hidrográfica, como os sugeridos por Almeida et al. (2023). Além disso, analisar as variáveis de qualidade da água em função da carga, ou seja, associadas aos dados de vazão, oferece um indicativo adicional importante para a gestão, que permite identificar o tipo de fonte de poluição e o esforço necessário para a redução em cada ponto analisado, direcionando os gestores quanto aos tipos de fontes a serem combatidas e qual o esforço financeiro mais eficaz, considerando o retorno em termos de redução.

Implicações para a gestão de recursos hídricos

A aplicação de curvas de permanência de carga oferece uma ferramenta complementar na integração de dados qualitativos e quantitativos para aprimorar o direcionamento tanto na avaliação da qualidade da água quanto nos esforços de restauração, permitindo uma caracterização mais precisa dos principais processos da bacia hidrográfica e priorizando locais estratégicos para intervenção (Cleland, 2003).

A análise dessas curvas permite identificar intervalos hidrológicos representativos e associá-los a condições como períodos secos e úmidos, contribuindo para a identificação das principais fontes de poluição e dos mecanismos de transporte de cargas (Cleland, 2003; United States Environmental Protection Agency, 2007; Machado et al., 2019). Quando combinada com informações sobre cobertura da terra, principais fontes de contaminação e usos da água, essa abordagem fortalece o planejamento de ações e a definição de medidas mais eficazes para controle da poluição. A aplicação original partindo de Cleland (2003) por meio da espacialização nas seções de controle e apresentação das reduções necessárias em termos percentuais, carga absoluta ($\text{kg} \cdot \text{dia}^{-1}$) e por unidade de área ($\text{kg} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$) permitem a análise comparativa e do esforço em cada região. Adicionalmente, abre a oportunidade para o cálculo da redução por área incremental.

A aplicação das curvas de permanência de carga está alinhada aos princípios da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), especialmente no que se refere à gestão integrada da quantidade e qualidade da água e à bacia hidrográfica como unidade de planejamento. Essa metodologia complementa instrumentos de gestão, como o enquadramento dos corpos hídricos, ao possibilitar um monitoramento mais dinâmico de sua implementação e a definição de metas progressivas de qualidade. A possibilidade de estabelecer percentuais mínimos de atendimento aos padrões de qualidade em diferentes condições hidrológicas proporciona maior flexibilidade e realismo à gestão (Bitencourt et al., 2019).

No contexto das curvas de permanência, é possível obter cenários transitórios e definir metas progressivas com base nas condições hidrológicas de cada trecho. Dessa forma, os gestores podem

segmentar as metas do enquadramento associando-as a percentuais de atendimento, permitindo uma visão mais abrangente e confiável da situação e fundamentando decisões mais consistentes.

A aplicação dessa abordagem no acompanhamento e implementação do enquadramento da bacia hidrográfica do Alto Iguaçu contribui não apenas para avaliar a efetividade do instrumento, mas também para subsidiar discussões sobre a alocação compartilhada do recurso, especialmente no que se refere às outorgas para lançamento de efluentes. Atualmente, o IAT e o comitê de bacia hidrográfica atuam como mediadores de conflitos relacionados às outorgas em trechos de rio cuja capacidade de assimilação já se encontra comprometida. Sob a ótica das curvas de permanência de carga, é possível avaliar cenários transitórios e estabelecer metas progressivas para esses trechos específicos, considerando suas condições hidrológicas, de forma a conciliar a manutenção dos usos e a preservação da qualidade ambiental dos recursos hídricos.

Essa prática já vem sendo adotada pelo órgão gestor estadual por meio da Declaração de Áreas Críticas (DAC). No contexto específico de áreas críticas declaradas devido à insuficiência de disponibilidade hídrica para assimilação de efluentes, a curva de permanência de carga pode auxiliar na definição de flexibilizações provisórias para adequação dos usuários ao limite máximo admissível para o trecho. Por exemplo, na proposição de metas transitórias para o período de adequação, o órgão gestor pode estabelecer que, em regimes de vazão dentro da faixa média (entre 10% e 90%), a soma das cargas lançadas deve se manter dentro de um limite progressivamente reduzido até atingir a meta definida para o trecho. Dessa forma, a metodologia integra os instrumentos de controle e planejamento, garantindo uma abordagem mais dinâmica e adaptativa para a gestão dos recursos hídricos.

Ao analisar a aplicação prática da metodologia probabilística na gestão dos recursos hídricos, é fundamental considerar a disponibilidade de dados em cada bacia hidrográfica. O uso de dados medidos sobre a qualidade da água enfrenta desafios técnicos, condições adversas de monitoramento e restrições econômicas, o que pode resultar em inconsistências e insuficiência de informações para uma análise robusta (Wang et al., 2019). Por outro lado, os dados modelados, embora eficazes, exigem amplo conhecimento e uma grande quantidade de informações para sua calibração e interpretação (Lee et al., 2020; Yin et al., 2020; Wang et al., 2019).

Os dados medidos são mais precisos e confiáveis para representar as condições atuais e passadas, pois capturam as dinâmicas da seção do rio e permitem identificar situações temporárias e excepcionais. Embora não haja uma dicotomia entre dados medidos e modelados, os primeiros são preferíveis para avaliações diagnósticas, enquanto os dados modelados são úteis na construção de cenários preditivos e na complementação de áreas sem monitoramento sistemático. Dessa forma, o monitoramento conjunto e sistemático da quantidade e qualidade da água é essencial para a criação de uma base de dados robusta, indispensável para o aprimoramento contínuo da gestão dos recursos hídricos.

Apesar da não estacionariedade das séries históricas de vazão ser comum, especialmente sob mudanças de uso e ocupação do solo e decorrente de mudanças climáticas (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2016, 2024), a análise em condições extremas (altas vazões – 0-10% e vazões mínimas – 90-100%) apresenta um histórico que subsidia o planejamento de estratégias baseadas em risco, como planos de resposta a crises, fortalecendo a gestão adaptativa. Essa abordagem ganha relevância diante de dois fatores:

- (i) a evolução da gestão dos recursos hídricos, que busca resgatar o enquadramento como instrumento de planejamento, em vez de mantê-lo predominantemente como ferramenta de comando e controle, como ocorreu nos primeiros 25 anos de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos; e
- (ii) os impactos das mudanças climáticas, que ampliam a frequência e intensidade dos eventos extremos, demandando uma gestão adaptativa capaz de antecipar cenários críticos e avaliar a resposta da qualidade da água nessas condições (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2016, 2024).

CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo oferecem uma compilação detalhada das informações necessárias para avaliar o cumprimento dos limites legais estabelecidos pela legislação ambiental e realizar uma análise da qualidade da água na bacia hidrográfica do Alto Iguaçu. Com base na série histórica avaliada (~1980 a 2022), conclui-se que a bacia hidrográfica atende parcialmente ao enquadramento definido pela Resolução Coaliar nº 04/2013 (Comitê das Bacias do Alto Iguaçu e Afluentes do Alto Ribeira, 2013) para os parâmetros DBO e fósforo. A combinação de expansão urbana, desenvolvimento industrial e alta densidade populacional faz do trecho central do rio Iguaçu uma das áreas mais críticas, concentrando

múltiplas fontes de poluição. A capacidade de assimilação das cargas nesse trecho mostrou-se insuficiente para atender aos limites estabelecidos, reforçando a necessidade de priorizar a redução de DBO e fósforo, sendo que a estação Guajuvira destaca-se como ponto prioritário. Recomenda-se a inclusão de projeções futuras para subsidiar a gestão e a manutenção da qualidade da água na bacia hidrográfica do Alto Iguaçu, considerando os impactos das atividades antrópicas e as dinâmicas hidrológicas nos padrões observados.

A análise dos mapas indica que a DBO é um parâmetro mais problemático nas áreas urbanizadas, sendo perceptível que sua principal fonte de poluição é possivelmente de origem pontual, uma vez que os maiores percentuais de redução são observados em vazões na faixa mínima de 90 a 100%. Para o fósforo, os maiores percentuais de redução ocorrem nas vazões máximas, sugerindo predominantemente fontes difusas.

A classificação dos trechos mais críticos como classe 4 sugere que o enquadramento atual reflete adequadamente a condição observada. No entanto, é necessária uma reavaliação no planejamento da gestão para assegurar a compatibilidade da qualidade da água com os usos previstos e a preservação da paisagem. Embora a Resolução Conama nº 357/2005 não estabeleça limites de concentração para DBO e fósforo nessa classe, a definição de metas de qualidade mais específicas para esses parâmetros é recomendada como medida de controle ambiental e prevenção da deterioração da qualidade da água.

A aplicação da metodologia das curvas de permanência de carga está alinhada aos princípios da PNRH, ao integrar a análise da quantidade e da qualidade da água para uma gestão mais eficaz. A consideração da variabilidade hidrológica permite uma abordagem de gestão mais adaptativa, essencial diante dos impactos crescentes das mudanças climáticas e da intensificação de eventos extremos. Essa metodologia possibilita o estabelecimento de metas progressivas de qualidade, baseadas em diferentes cenários de conformidade e condições hidrológicas, contribuindo para um monitoramento mais realista e viável da efetividade do enquadramento. Essas metas podem ser facilmente compreendidas e visualizadas conforme as condições hidrológicas. Além disso, a metodologia fomenta reflexões no contexto do planejamento, como a definição de um percentual mínimo para atender à qualidade da água, proporcionando maior precisão no monitoramento da efetivação do enquadramento.

Este estudo fornece subsídios valiosos para a gestão dos recursos hídricos na bacia hidrográfica do Alto Iguaçu, não apenas ao verificar o atendimento ao enquadramento, mas também ao identificar áreas prioritárias para intervenção e quantificar a necessidade de redução de cargas poluentes em diferentes condições hidrológicas. A adoção da metodologia probabilística das curvas de permanência de carga apresenta-se como uma ferramenta complementar robusta ou alternativa para o monitoramento e a implementação do enquadramento, subsidiando a tomada de decisões sobre a alocação de recursos hídricos e o controle de lançamentos de efluentes. Além disso, essa abordagem é acessível a públicos distintos, incluindo aqueles sem formação técnica específica, apresentando uma linguagem de fácil interpretação para os ambientes de tomada de decisão, que envolvem diversos públicos, como o poder público, os usuários de recursos hídricos e a sociedade civil. Recomenda-se sua incorporação à gestão da bacia hidrográfica, promovendo uma abordagem mais integrada e adaptativa para a sustentabilidade dos recursos hídricos a longo prazo.

Estudos futuros tanto de diagnóstico quanto prognóstico poderiam incorporar simulações com dados medidos na construção de curvas de permanência de carga, atuando como um elemento de sinergia de estratégias e calibração dos modelos. Adicionalmente, como no presente estudo de caso, recomenda-se utilizar as informações disponíveis para apresentar metas de redução de cargas em uma perspectiva das bacias incrementais aos comitês de bacias e órgãos ambientais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA. (2016). *Mudanças climáticas e recursos hídricos: avaliações e diretrizes para adaptação*. Brasília: ANA, GGES, 2016.
- Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA. (2019). *ODS 6 no Brasil: visão da ANA sobre os indicadores* (1. ed.). Brasília: ANA.
- Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA. (2022). *Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2021: relatório pleno*. Brasília: ANA. Recuperado em 6 de março de 2025, de https://www.snh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conjuntura_2021_pdf_final_revdirec.pdf
- Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA. (2024). *Impacto da mudança climática nos recursos hídricos no Brasil*. Brasília: ANA.
- Almeida, C. C., Peixoto, L. O. M., Sieciechowicz, M. S. F., Fernandes, C. V. S., Azevedo, J. C. R., & Centeno, J. A. S. (2023). Representative water quality parameters in a critical water basin: elements for planning and management. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 28, e36. <http://doi.org/10.1590/2318-0331.282320230035>

- Bianek, J. (2023). *Aplicação de curvas de permanência de carga como ferramenta de gestão de recursos hídricos e o estudo de caso da bacia do alto Iguaçu* (Dissertação de mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Bianek, J., & Mannich, M. (2021). Aplicação de curvas de permanência de qualidade da água para a bacia do rio Passaúna. In *Anais do XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Belo Horizonte, MG.
- Bitencourt, C. C. A. (2018). *Integração de análise estatística multivariada e geoprocessamento: aplicação para estudos de enquadramento de corpos d'água* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Bitencourt, C. C. A., Fernandes, C. V. S., & Gallego, C. E. C. (2019). Panorama do enquadramento no Brasil: uma reflexão crítica. *Revista de Gestão de Águas da América Latina*, 16(1), 9. <http://doi.org/10.21168/rega.v16e9>
- Bittencourt, S., & Gobbi, E. F. (2006). Carga máxima de fósforo admissível ao reservatório piraquara ii, uma aplicação do processo TMDL. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 30(3), 595-603. <http://doi.org/10.1590/S0100-06832006000300019>
- Bonamigo, A., Gurski, L. K. K., Drummond, S. B. M., Bleninger, T., & Scheer, M. B. (2021). Aplicação de curvas de permanência de fósforo total para avaliação de variações de concentrações no rio Passaúna. In *Anais do XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Belo Horizonte, MG.
- Brasil. (1997). Lei Federal 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília.
- Brasil. Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA. (2005). Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento dos corpos de águas superficiais, bem como estabelece as condições e padrões de lançamentos de efluentes. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília.
- Brasil. Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA. (2011). Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília.
- Brites, A. P. Z. (2010). *Enquadramento dos corpos de água através de metas progressivas: probabilidade de ocorrência e custos de despoluição hídrica* (Tese de doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Carneiro, C., Andreoli, C. V., Gutseit, K. C., Kondageski, J. H., Lagos, P. E. D., & Okumoto, H. H. (2014). Assessing the pollution potential of lake basins: Concentrations and loads. In C. Carneiro, C. V. Andreoli, C. L. N. Cunha & E. F. Gobbi (Eds.), *Reservoir eutrophication: preventive management. An introduction to eutrophication and the studies* (pp. 161-189). IWA Publishing.
- Cleland, B. R. (2002). TMDL development from the “bottom up” – part II: using duration curves to connect the pieces. In *National TMDL Science and Policy 2002 - WEF Specialty Conference*, Phoenix, AZ.
- Cleland, B. R. (2003). TMDL development from the “bottom up” – part III: duration curves and wet-weather assessments. In *National TMDL Science and Policy 2003 - WEF Specialty Conference*, Chicago, IL.
- Comitê das Bacias do Alto Iguaçu e Afluentes do Alto Ribeira – COALIAR. (2013). *Resolução nº 04 do Comitê das Bacias do Alto Iguaçu e Afluentes do Alto Ribeira – COALIAR, de 11 de julho de 2013. Aprova proposição de atualização do enquadramento dos corpos de água superficiais de domínio do Estado do Paraná, na área de abrangência do Comitê das Bacias do Alto Iguaçu e Afluentes do Alto Ribeira, em classes, de acordo com os usos preponderantes*. Curitiba. Recuperado em 20 de fevereiro de 2025, de https://www.sedest.pr.gov.br/sites/default/arquivos_restritos/files/migrados/File/CERH_-_22_RO/resolucao_enquadramento_coaliar.pdf.
- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB. (2019). *Relatório de qualidade das águas interiores no Estado de São Paulo – 2018: Apêndice D: Índices de qualidade das águas*. São Paulo. Recuperado em 6 de março de 2025, de <https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/12/2017/11/Apendice-D-Indices-de-Qualidade-das-Aguas.pdf>.
- Companhia de Saneamento do Paraná – Sanepar. (2013). *Plano Diretor SAIC: Sistema de Abastecimento de Água Integrado de Curitiba e Região Metropolitana* (p. 142). Sanepar. Recuperado em 20 de fevereiro de 2025, de <https://site.sanepar.com.br/arquivos/saicplandiretor.pdf>.
- Companhia de Saneamento do Paraná – Sanepar. (2020). *Plano de uso e conservação das águas e entorno do reservatório do Miringuava (Pacuera do Miringuava). Criação da Área de Proteção Ambiental – APA do Miringuava: Elaboração do respectivo Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE), e do Plano de uso e conservação das águas e entorno do reservatório para abastecimento público do Miringuava (Pacuera)* (Vol. III, Produto VI). Sociedade da Água - Serviços Ambientais e Geotecnologias. Recuperado em 27 de fevereiro de 2025, de https://site.sanepar.com.br/sites/site.sanepar.com.br/files/2_pacuera_miringuava_rev_1.pdf.
- Constantino, W. L., Del Monego, M. L., Lima, B. A., Medeiros, S. T., Peixoto, L. O., & Azevedo, J. C. R. (2025). Avaliação da qualidade da água em um manancial de abastecimento público: combinado com o índice geral de contaminação humana. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, 19(1), 1-16.

- Cruz, J., & Tucci, C. (2008). Estimativa da disponibilidade hídrica através da curva de permanência. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 13(1), 111-124. <http://doi.org/10.21168/rbrh.v13n1.p111-124>
- Cunha, D. G. F., & Calijuri, M. C. (2010). Análise probabilística de ocorrência de incompatibilidade da qualidade da água com o enquadramento legal de sistemas aquáticos – estudo de caso do rio Paráquera-Açu (SP). *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 15(4), 337-346. <http://doi.org/10.1590/S1413-41522010000400006>
- Cunha, D. G. F., Calijuri, M. D. C., & Mendiondo, E. M. (2012). Integração entre curvas de permanência de quantidade e qualidade da água como uma ferramenta para a gestão eficiente dos recursos hídricos. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 17(4), 369-376. <http://doi.org/10.1590/S1413-41522012000400003>
- Detzel, D., Fernandes, C., & Mine, M. (2016). Nonstationarity in building flow duration curves aiming at obtaining water resource permits. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 21(1), 80-87. <http://doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.p80-87>
- Drummond, S. B. M. (2020). *Análise temporal de poluentes difusos no rio Passaúna por meio da utilização de amostrador automático* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Drummond, S. B. M., Gurski, L. K. K., Leithold, J., Oliveira, D. M., Buchir, L. M. S. T., & Centeno, J. A. S. (2019). Evolução do uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do rio Passaúna (1990-2017). In *Anais do XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Foz do Iguaçu, PR.
- Formigoni, Y., Brites, A. P., Fernandes, C., & Porto, M. (2011). Análise crítica da curva de permanência de qualidade da água com base em dados históricos. In *Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Maceió, AL, Brasil.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. (2022). *Censo demográfico 2022*. Rio de Janeiro: IBGE. Recuperado em 6 de março de 2025, de <https://censo.ibge.gov.br>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. (2023). *Estimativas da população residente no Brasil para 2023*. Rio de Janeiro: IBGE. Recuperado em 6 de março de 2025, de <https://cidades.ibge.gov.br>
- Instituto Água e Terra – IAT. (2022). *Sistema de informações hidrológicas*. Recuperado em 6 de março de 2025, de <https://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Sistema-de-Informacoes-Hidrologicas>
- Instituto Água e Terra – IAT. (2025). *Monitoramento da qualidade da água no Estado do Paraná*. Recuperado em 28 de fevereiro de 2025, de <https://geopr.iat.pr.gov.br/portal/apps/dashboards/3db503757e5b4fe7890a9ef676ced55e>
- Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social – Ipardes. (2017). *Indicadores de desenvolvimento sustentável por bacias hidrográficas do Estado do Paraná*. Recuperado em 10 de fevereiro de 2025, de https://www.ipardes.pr.gov.br/sites/ipardes/arquivos_restritos/files/documento/2019-09/Revista%20Indicadores%20de%20Desenvolvimento%20Sustent%C3%A1vel.pdf
- Jouanneau, S., Recoules, L., Durand, M. J., Boukabache, A., Picot, V., Primault, Y., Lakel, A., Sengelin, M., Barillon, B., & Thouand, G. (2014). Methods for assessing biochemical oxygen demand (BOD): a review. *Water Research*, 49, 62-82. <http://doi.org/10.1016/j.watres.2013.10.066>
- Kozak, C., & Fernandes, C. (2022). A influência dos eventos de precipitação e poluição difusa em rios: implicações para os instrumentos de gestão dos recursos hídricos. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, 19, e23.
- Law, J. Y., Long, L. A., Kaleita, A., Helmers, M., Brendel, C., van der Woude, K., & Soupir, M. (2022). Stacked conservation practices reduce nitrogen loss: a paired watershed study. *Journal of Environmental Management*, 302, 114053. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114053>
- Lee, D. H., Kim, J. H., Park, M.-H., Stenstrom, M. K., & Kang, J.-H. (2020). Automatic calibration and improvements on an instream chlorophyll a simulation in the HSPF model. *Ecological Modelling*, 415, 108835. <http://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2019.108835>
- Leithold, J., Fernandes, C. V. S., Knapik, H. G., & Azevedo, J. C. R. (2017). Quali-quantitative characterization of organic matter in urbanized drainage basins as a basis for the application of Water Resources Management Instruments. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 22, e55. <http://doi.org/10.1590/2318-0331.021720160065>
- Machado, E. S., Knapik, H. G., & Bitencourt, C. C. A. (2019). Considerações sobre o processo de enquadramento de corpos de água. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 24(2), 261-269. <http://doi.org/10.1590/s1413-41522019181252>
- Marques, L. O. A., Taffarello, D., Calijuri, M. C., Mendiondo, E. M., Ferreira, M. S., & Cunha, D. G. F. (2019). Phosphorus and thermotolerant coliforms' loads in Brazilian watersheds with limited data: considerations on the integrated analysis of water quality and quantity. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 24, e3. <http://doi.org/10.1590/2318-0331.241920170137>
- Mizukawa, A., Filipe, T. C., Peixoto, L. O. M., Scipioni, B., Leonardi, I. R., & Azevedo, J. C. R. (2019). Caffeine as a chemical tracer for contamination of urban rivers. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 24, e29. <http://doi.org/10.1590/2318-0331.241920180184>
- Naghettini, M., & Pinto, E. J. A. (2007). *Hidrologia estatística*. Belo Horizonte: CPRM.
- Paraná. Instituto Água e Terra. (2007a). *Relatório de diagnóstico do Plano das Bacias do Alto Iguaçu e Afluentes do Alto Ribeira*. Curitiba. Recuperado em 20 de fevereiro, de <https://www.iat.pr.gov.br/sites/aguaterra/>

- arquivos_restritos/files/documento/2020-05/cap02_03_introducao.pdf
- Paraná. Superintendência de Recursos Hídricos e Saneamento – SUDERHSA. (2007b). *Plano da bacia do Alto Iguaçu e afluentes do Alto Ribeira: relatório de diagnóstico*. Curitiba. Recuperado em 15 de janeiro de 2025, de https://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files/documento/2020-05/cap02_03_introducao.pdf.
- Paraná. Instituto Água e Terra. (2013). *Finalização do plano das bacias do Alto Iguaçu e afluentes do Alto Ribeira: relatório técnico produto 10 - versão 01*. Curitiba: AGUASPARANÁ. Recuperado em 20 de fevereiro, de https://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files/documento/2020-05/finalizacao_plano.pdf.
- Paraná. Agência Estadual de Notícias. (2023). *Ação ambiental envolve agricultores de hortaliças para melhorar água do Miringuava*. Curitiba. Recuperado em 20 de fevereiro, de <https://www.aen.pr.gov.br/Noticia/Acao-ambiental-envolve-agricultores-de-hortaliacas-para-melhorar-agua-do-Miringuava>.
- Reyes, N. J., Geronimo, F. K., & Kim, L.-H. (2020). Evaluation of the factors influencing the treatment performance of a livestock constructed wetland. *Ecological Engineering*, 149, 105811. <http://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105811>
- Rodrigues, M. B., Reis, J. A. T., Sá, G. L. N., Almeida, K. N., & Mendonça, A. S. F. (2022). Perspectivas para revisão do enquadramento da bacia hidrográfica do Rio Benevente pelo emprego de curva de permanência e modelagem da qualidade da água. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 27(4), 831-843. <http://doi.org/10.1590/s1413-415220210295>
- Sá, D., & Silva, M. V. G. (2019). O papel do Estado no processo de formação industrial: o caso da Região Metropolitana de Curitiba. *Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais*, 21(1), 314-331. <http://doi.org/10.22296/2317-1529.2019v21n1p189>
- Salzmann, R. D., & Mannich, M. (2015). Aplicação de curvas de permanência na análise da qualidade da água na bacia do Alto Iguaçu. In *Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Brasília, DF.
- Santos, B. D. N. (2023). Análise ambiental integrada da bacia hidrográfica do Rio Miringuava: um estudo de caso dos impactos ambientais locais. *Brazilian Journal of Development*, 9(2), 6256-6275. <http://doi.org/10.34117/bjdv9n2-006>
- Serrano, L. O., Borges, A. C., Pruski, F. F., & Melo, M. C. (2020). A new approach to use load duration curves to evaluate water quality: a study in the Doce River Basin, Brazil. *Water*, 12(3), 811. <http://doi.org/10.3390/w12030811>
- South Carolina. Department of Health & Environmental Control. (2005). *Total Maximum Daily Load (TMDL) for fecal coliform for hills creek, lynes river, north and south Branch of Wildcat Creek, Flat Creek, Turkey Creek, Nasty Branch, Gully Branch, Smith Swamp, Little Pee Dee River, Maple Swamp, White Oak Creek, and Chinners Swamp of the Pee Dee River Basin, South Carolina* (Technical Report, No. 029-05). South Carolina: SCDHEC.
- Stefan, E., & Fernandes, C. V. S. (2020). Water availability and water reuse: a new approach for water resources management. In United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (Ed.), *Water reuse within a circular economy context* (Vol. 2, pp. 71-83). Paris: UNESCO.
- United States Environmental Protection Agency – USEPA. (2007). *An approach for using load duration curves in the development of TMDLs*. Washington, D.C.: Office of Wetlands, Oceans, Watersheds.
- Wang, J., Zhang, X.-H., Xu, C.-Y., Wang, H., Lei, X., Wang, X., & Li, S. (2019). Development of load duration curve system in data-scarce watersheds based on a distributed hydrological model. *Nordic Hydrology*, 50(3), 886-900. <http://doi.org/10.2166/nh.2019.117>
- Woo, S.-Y., Kim, S.-J., Lee, J.-W., Kim, S.-H., & Kim, Y.-W. (2021). Evaluating the impact of interbasin water transfer on water quality in the recipient river basin with SWAT. *The Science of the Total Environment*, 776, 145984. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145984>
- Xie, H., Dong, J., Shen, Z., Chen, L., Lai, X., Qiu, J., Wei, G., Peng, Y., & Chen, X. (2019). Intra- and inter-event characteristics and controlling factors of agricultural nonpoint source pollution under different types of rainfall-runoff events. *Catena*, 182, 104105. <http://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104105>
- Yin, D., Evans, B., Wang, Q., Chen, Z., Jia, H., Chen, A. S., Fu, G., Ahmad, S., & Leng, L. (2020). Integrated 1D and 2D model for better assessing runoff quantity control of low impact development facilities on community scale. *The Science of the Total Environment*, 720, 137630. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137630>

Contribuições dos autores:

Julia Bianek: curadoria de dados, análise de dados, desenvolvimento, implementação e teste de software, redação do manuscrito original, redação - revisão e edição, design da apresentação de dados.

Cristóvão Vicente Scapulatempo Fernandes: redação do manuscrito original, redação - revisão e edição.

Michael Mannich: conceitualização, pesquisa, metodologia, proposição da pesquisa, redação do manuscrito original, redação - revisão e edição, design da apresentação de dados, supervisão.