

## XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

### **APLICAÇÃO DO ÍNDICE DE CONFORMIDADE AO ENQUADRAMENTO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO BEBERIBE, EM PERNAMBUCO**

*Jocimar Coutinho Rodrigues Junior<sup>1</sup>; Ester Milena dos Santos<sup>2</sup>; Camila Oliveira de Britto Salgueiro<sup>3</sup>; Lucas Amorim Amaral Menezes<sup>4</sup>; Mayara Silva de Olivera<sup>5</sup>; Leidiane Maria Maciel de Oliveira<sup>6</sup>; Sylvana Melo Dos Santos<sup>7</sup> & Anderson Luiz Ribeiro De Paiva<sup>8</sup>*

**Abstract:** The Beberibe River watershed, located in the state of Pernambuco, faces serious environmental challenges resulting from unplanned urban expansion, which significantly compromises the quality of its water resources. In this context, the present study aimed to apply the Water Quality Compliance Index (ICE) at monitoring points throughout the basin in order to assess the adherence of water quality to the classification standards established by the competent authorities. The methodology was based on the analysis of annual water quality data collected between 2006 and 2018 by the Pernambuco State Environmental Agency (CPRH), considering the parameters of dissolved oxygen, biochemical oxygen demand, ammonia, and phosphorus, as defined by CONAMA Resolution No. 357/2005 for Classes 2 and 3. The results indicated high compliance levels in the headwater segments, particularly at points BE-01 and BE-09, with values exceeding 70 and 85 for Classes 2 and 3, respectively. In contrast, points located in densely urbanized areas, such as BE-30, BE-45, and BE-50, showed compliance levels below 30 in both classes, highlighting the direct impact of anthropogenic activities on water quality degradation. The application of the ICE proved to be an effective tool for supporting the management and monitoring of the basin's water bodies and is essential for the development of mitigation and environmental recovery strategies.

**Resumo:** A bacia hidrográfica do rio Beberibe, situada no estado de Pernambuco, enfrenta sérios desafios. A bacia hidrográfica do rio Beberibe, localizada no estado de Pernambuco, enfrenta sérios desafios ambientais decorrentes da expansão urbana desordenada, que compromete significativamente a qualidade de seus recursos hídricos. Neste contexto, o presente estudo teve como objetivo aplicar o Índice de Conformidade ao Enquadramento (ICE) em pontos de monitoramento da bacia, visando avaliar a aderência da qualidade da água às classes de enquadramento definidas pelos órgãos competentes. A metodologia baseou-se na análise de dados anuais de qualidade da água, coletados entre 2006 e 2018 pela Agência Estadual de Meio Ambiente de Pernambuco (CPRH), considerando os parâmetros oxigênio dissolvido, demanda bioquímica de oxigênio, amônia e fósforo, conforme estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para as classes 2 e 3. Os resultados indicaram elevados índices de conformidade nos trechos de cabeceira, especialmente nos pontos BE-

1) Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGE, Universidade Federal de Pernambuco - UFPE. Rua Acadêmico Hélio Ramos, s/n, Cidade Universitária. 50.740-530. Recife/PE – Brasil. Fone: +55 81 2126.8223. E-mail: jocimar.junior@ufpe.br

2) Doutoranda do PPGE, UFPE, Recife-PE, e-mail: ester.santos@ufpe.br

3) Doutoranda do PPGE, UFPE, Recife-PE, e-mail: camila.salgueiro@ufpe.br

4) Doutorando do PPGE, UFPE, Recife-PE, e-mail: lucas.laam@ufpe.br

5) Doutoranda do PPGE, UFPE, Recife-PE, e-mail: mayara.oliveira@ufpe.br

6) Professora Adjunta do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental - DECIV, docente permanente do PPGE, UFPE, Recife-PE, e-mail: leidiane.oliveira@ufpe.br

7) Professora Titular do DECIV, docente permanente do PPGE, UFPE, Recife-PE, e-mail: sylvana.santos@ufpe.br

8) Professor Associado do DECIV, docente permanente do PPGE, UFPE, Recife-PE, e-mail: anderson.paiva@ufpe.br

01 e BE-09, com valores superiores a 70 e 85 nas Classes 2 e 3, respectivamente. Em contrapartida, pontos inseridos em áreas de urbanização densa, como BE-30, BE-45 e BE-50, apresentaram conformidades inferiores a 30 em ambas as classes, evidenciando a influência direta das atividades antrópicas na deterioração da qualidade da água. A aplicação do ICE demonstrou-se uma ferramenta eficaz para subsidiar a gestão e o monitoramento dos corpos hídricos da bacia, sendo essencial para o desenvolvimento de estratégias de mitigação e recuperação ambiental.

**Palavras-Chave** – qualidade de água; gestão de recursos hídricos; impactos ambientais.

## INTRODUÇÃO

A ocupação histórica das bacias hidrográficas tem sido orientada, em grande medida, por critérios de conveniência econômica, com o intuito de reduzir custos e maximizar benefícios. Entretanto, o crescimento populacional acelerado e a exploração desordenada dos recursos naturais, em especial os recursos hídricos, vêm impondo pressões intensas sobre os sistemas fluviais, comprometendo tanto a disponibilidade quanto a qualidade da água (Greggio *et al.*, 2020). Diante desse contexto, os recursos hídricos, fundamentais à manutenção da vida e ao desenvolvimento socioeconômico, têm se tornado objeto de crescente preocupação internacional, especialmente no que tange à degradação da qualidade das águas em bacias hidrográficas submetidas a intensos processos antrópicos (Kumwimba *et al.*, 2023).

Relatórios internacionais, como os publicados pela Organização das Nações Unidas (UNU, 2018), indicam uma deterioração progressiva da qualidade da água em escala global, destacando o aumento substancial na concentração de patógenos, matéria orgânica, nutrientes e sais dissolvidos. Os principais vetores dessa degradação incluem a expansão urbana não planejada, a industrialização sem controle ambiental, o uso intensivo de insumos químicos na agricultura, a disposição inadequada de efluentes e resíduos sólidos, bem como a exploração predatória dos leitos fluviais (Wan e Wang, 2021). Tais práticas comprometem a integridade ecológica dos ecossistemas aquáticos e geram implicações severas para os serviços ambientais prestados pelos corpos hídricos, despertando o interesse da comunidade científica em compreender os efeitos do uso e ocupação do solo sobre a qualidade da água a jusante (Karr *et al.*, 2022).

A complexidade crescente dos conflitos pelo uso da água, resultantes de múltiplos interesses e demandas concorrentes, impõe à gestão dos recursos hídricos um desafio de natureza estratégica. A adoção de abordagens integradas, participativas e descentralizadas mostra-se fundamental para garantir o equilíbrio entre conservação ambiental e desenvolvimento. Todavia, obstáculos como o aumento da demanda hídrica, os efeitos das mudanças climáticas, a deficiência em infraestrutura de saneamento básico e os processos de urbanização descontrolada comprometem os esforços de governança e demandam instrumentos robustos de diagnóstico e planejamento (Zhang *et al.*, 2021; Stephenson *et al.*, 2022).

Nesse escopo, destaca-se a aplicação do Índice de Conformidade ao Enquadramento (ICE), ferramenta analítica que permite mensurar o grau de aderência da qualidade da água às classes estabelecidas no enquadramento dos corpos hídricos (Hinata *et al.*, 2023). Tal índice constitui uma referência estratégica para a avaliação do cumprimento dos objetivos ambientais previstos nas normativas vigentes, permitindo não apenas aferir a eficácia das políticas públicas de controle da poluição, como também identificar áreas críticas que demandam ações corretivas e investimentos prioritários em infraestrutura ambiental.

Diante do exposto, o presente estudo tem por objetivo analisar a qualidade da água na bacia hidrográfica do rio Beberibe, por meio da aplicação do Índice de Conformidade ao Enquadramento

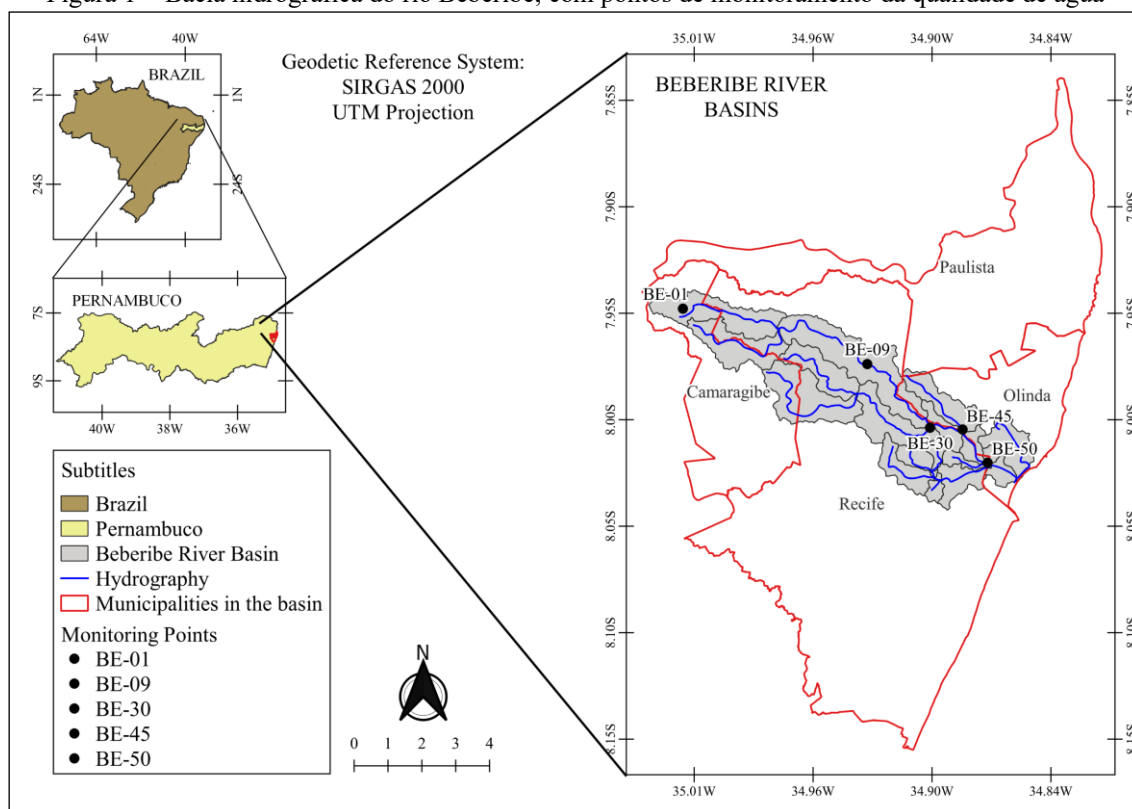
(ICE), buscando identificar padrões espaciais de degradação, contrastes entre diferentes setores da bacia e áreas prioritárias para intervenção. Espera-se, com isso, subsidiar estratégias de gestão ambiental que promovam a proteção dos recursos hídricos e a melhoria das condições ecológicas dos ecossistemas fluviais.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Área de estudo

A área deste estudo é a bacia do rio Beberibe, Figura 1, que se localiza na bacia pernambucana Metropolitana Norte (UP02). Seu rio principal possui extensão aproximada de 23,27 km e a bacia drena uma área de 79 km<sup>2</sup>, o rio percorre os seguintes municípios: Camaragibe, onde se localiza a nascente, bem como Recife, Paulista e Olinda, de onde deságua no Oceano Atlântico. Essas áreas urbanas possuem população conjunta significativa de 2.288.834 habitantes, com densidade demográfica expressiva de 5.609,89 hab./km<sup>2</sup> (IBGE, 2022).

Figura 1 – Bacia hidrográfica do rio Beberibe, com pontos de monitoramento da qualidade de água



Para conduzir a análise, utilizou-se os dados de monitoramento coletados pela Agência Estadual de Meio Ambiente (CPRH) do estado de Pernambuco (CPRH, 2021). O banco de dados do órgão abrange o curso d'água do rio Beberibe compreendendo cinco pontos distintos de monitoramento, conforme ilustrado na Figura 1, esses pontos são identificados como BE-01, BE-09, BE-30, BE-45 e BE-50, detalhados no Quadro 1 com informações abrangentes sobre as características dos locais de amostragem.

Quadro 1 – Caracterização dos pontos monitorados ao longo do rio Beberibe

Estação	Corpo d'água	Descrição do local
BE-01	Rio Araçá	Habitacional rarefeita. Na nascente do rio Beberibe, no açude no Clube Sete Casuarinas, em Aldeia, Camaragibe.
BE-09	Rio Beberibe	Habitacional rarefeita. Na captação da COMPESA em Guabiraba, Recife.
BE-30	Rio Morno	Habitacional densa. Na ponte na Estrada do Cumbe, acesso à Linha do Tiro, Recife.
BE-45	Riacho Lava Tripa	Habitacional densa. Na ponte da Av. Presidente Kennedy, Olinda.
BE-50	Rio Beberibe	Habitacional densa. Após receber o Canal Vasco da Gama, na ponte de acesso a Peixinhos, na divisa das cidades de Olinda e Recife.

Fonte das informações: CPRH (2021).

### Cálculo do Índice de Conformidade ao Enquadramento

O Índice de Conformidade ao Enquadramento (ICE) é composto por 3 tipos de fatores: abrangência, frequência e amplitude, que juntos compõem um vetor no espaço tridimensional utilizando-se de um método matemático de cálculo estatístico tendo como base a junção desses fatores (CCME, 2003). Neste estudo, o ICE foi calculado a partir dos dados do período de 2006 a 2018, sendo possível averiguar a conformidade ao enquadramento.

Ademais, o referido índice também foi calculado considerando os parâmetros apresentados na Tabela 1, com seus respectivos limites estabelecidos para as classes 2 e 3, conforme a Resolução nº 357 do CONAMA. Esses parâmetros servem como base para a análise da conformidade da qualidade da água em relação aos padrões ambientais exigidos para corpos d'água de Classe 2, destinados ao abastecimento humano, recreação, e proteção da vida aquática, e de Classe 3, com usos mais restritos, como navegação e irrigação.

Tabela 1 – Parâmetros utilizados para cálculo do ICE

Parâmetro	Unidade	Objetivo	Valor objetivo para Classe 2	Valor objetivo para Classe 3
OD	mg/L	Mínimo	5	4
DBO	mg/L	Máximo	5	10
Fósforo Total	mg/L	Máximo	0,1	0,15
Amônia	mg/L	Máximo	3,7	13,3

Deste modo, depois que o corpo hídrico, o intervalo de tempo, os parâmetros de qualidade e os objetivos são escolhidos, todos os três fatores que compõem o ICE devem ser calculados. Assim, o cálculo de F1 e F2 são diretos e o de F3 requer alguns passos adicionais (CCME, 2003). O Fator 1, corresponde a abrangência ( $F_1$ ), representa a porcentagem de variáveis envolvidas que não alcançaram os objetivos e não cumprem os limites estipulados pela classe de qualidade pelo menos uma vez no período observado, em relação ao número total de variáveis analisadas. A fórmula para o cálculo do Fator 1 é representada pela Equação 1.

$$F_1 = \left( \frac{\text{Número de variáveis que falharam}}{\text{Número total de variáveis}} \right) \times 100 \quad (1)$$

O Fator 2, refere-se à frequência ( $F_2$ ), representa a porcentagem de testes individuais para cada variável que não alcançaram os objetivos e não cumprem os limites estipulados pela classe de

qualidade no período observado, em relação ao número total de testes. O cálculo do Fator 2 é representada pela Equação 2.

$$F_2 = \left( \frac{\text{Número de testes que falharam}}{\text{Número total de testes}} \right) \times 100 \quad (2)$$

Ademais, o Fator 3, corresponde a amplitude ( $F_3$ ), representa a quantidade pela qual o valor do teste falhou, ou seja, a quantidade que o teste extrapola dos limites estipulados pela classe de qualidade, sendo calculado em três etapas:

- i) O número de vezes em que uma concentração individual é maior que (ou menor que, se o objetivo desejado é o mínimo) o limite estipulado da qualidade da classe.
- ii) O número de total de testes individuais que estão em desacordo com o limite estipulado pela qualidade da classe; sendo calculado pela soma de todas as variações individuais dos testes que falharam e dividido pelo número total de testes, denominada soma normalizada das variações (*snv*). As Equações 3 a 5, apresentam o cálculo do *snv*.
- iii) O  $F_3$  é calculado através da *snv* em relação aos limites estabelecidos com valores reduzidos a uma variável entre 0 e 100. O cálculo do Fator 3 é representada pela Equação 6.

$$snv = \frac{\sum \Delta Vi}{\text{Número total de testes}} \quad (3)$$

Para casos em que o valor do teste não deve exceder o objetivo:

$$\Delta Vi = \left( \frac{\text{Valor teste que falhou}}{\text{Objetivo}} \right) - 1 \quad (4)$$

Para casos em que o valor do teste não deve ser abaixo do objetivo:

$$\Delta Vi = \left( \frac{\text{Objetivo}}{\text{Valor teste que falhou}} \right) * 100 \quad (5)$$

$$F_3 = \left( \frac{snv}{0,01 * snv + 0,01} \right) \quad (6)$$

Após os cálculos dos fatores  $F_1$ ,  $F_2$  e  $F_3$ , determina-se então, o valor do ICE, de acordo com a Equação 7. Para isso, é utilizado um valor de 1,732, com a finalidade de garantir o comprimento máximo do vetor que representa as falhas observadas, além de ser empregado para normalizar o resultado. Posteriormente, os valores de ICE obtidos são classificados em cinco categorias variando de 0 a 100, de acordo com o Quadro 2.

$$ICE = 100 - \left( \frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1,732} \right) \quad (7)$$

Quadro 2 – Classificação do ICE em função da descrição da qualidade da água

Excelente (95-100)	Protegida, ausência de ameaça/degradação; condições próximas aos naturais ou primitivas.
Bom (80-94)	Protegida, com mínimo grau de ameaça; condições raramente se afastam do natural.
Mediano (65-79)	Geralmente protegida, mas ocasionalmente ameaçada/prejudicada; condições às vezes se afastam do natural ou de níveis desejáveis.
Marginal (45-64)	Frequentemente ameaçada; condições frequentemente se afastam de seus níveis desejáveis.
Ruim (0-44)	Quase sempre ameaçada ou degradada; condições usualmente distantes de níveis desejáveis.

Fonte: CCME (2003).

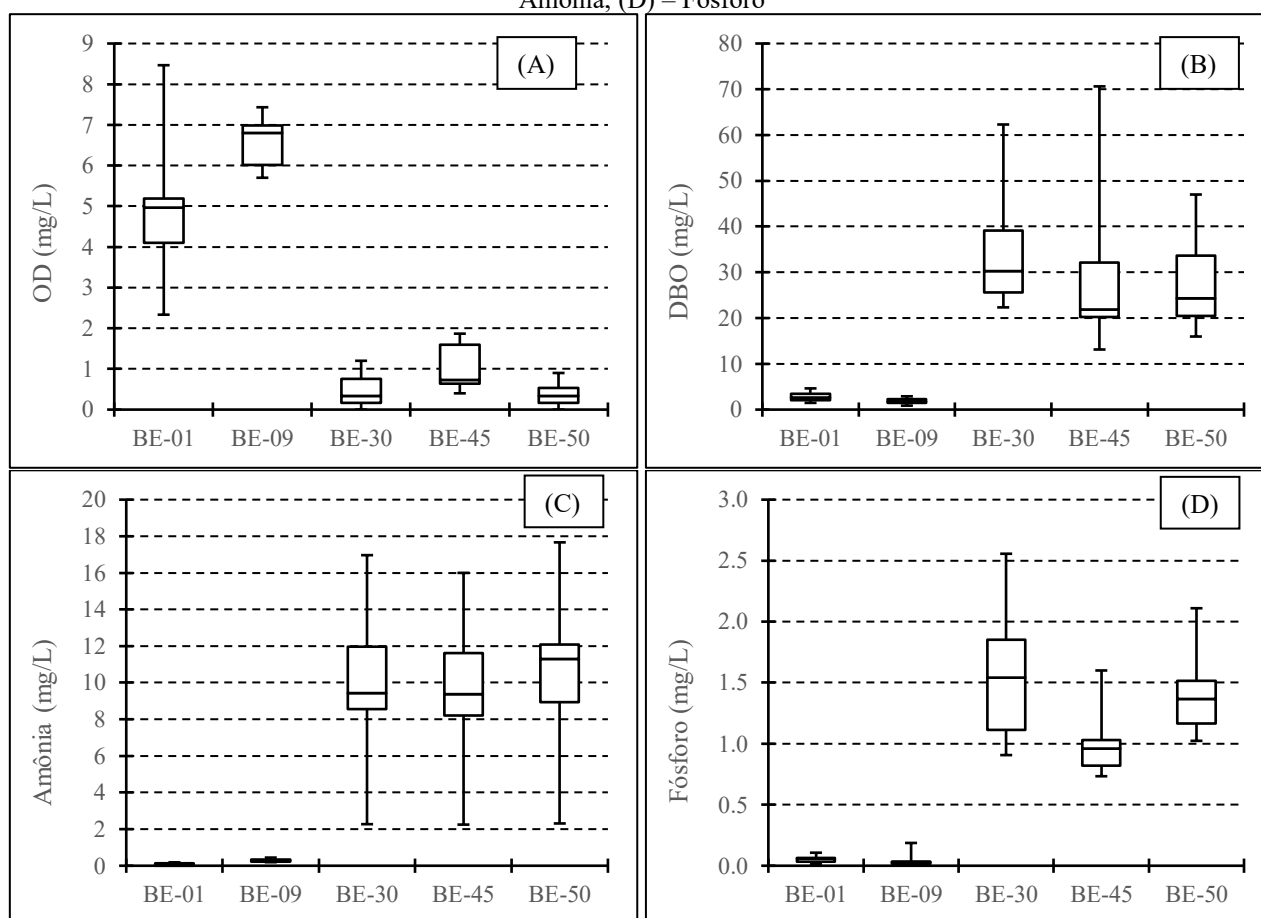


## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base nos dados de qualidade da água, procedeu-se à análise descritiva dos principais parâmetros nos diversos pontos de monitoramento, a qual evidenciou discrepâncias notáveis entre os trechos de cabeceira e os segmentos inseridos em zonas de urbanização intensa. Na Figura 2 observa-se tais contrastes, revelando de modo contundente a influência das pressões antrópicas sobre a integridade dos corpos hídricos da bacia.

Os valores de oxigênio dissolvido apresentaram-se substancialmente mais elevados nos pontos BE-09 e BE-01, com médias de 6,56 mg/L e 4,85 mg/L, respectivamente. Esses pontos estão localizados em áreas de baixa densidade populacional, próximas às nascentes da bacia, onde predominam condições menos impactadas. Além disso, os baixos desvios-padrão observados sugerem relativa estabilidade das concentrações ao longo do período analisado. Em sentido oposto, os pontos BE-30, BE-45 e BE-50, localizados em setores altamente urbanizados, exibiram médias extremamente reduzidas, variando entre 0,36 e 1,07 mg/L, com valores mínimos de até 0,00 mg/L. Essa condição aponta para episódios recorrentes de hipoxia ou anoxia, compatíveis com ambientes submetidos a cargas orgânicas elevadas e severamente comprometidos em sua capacidade de autodepuração.

Figura 2 – Dados de qualidade de água na bacia do rio Beberibe, entre 2006 e 2018, sendo: (A) – OD, (B) – DBO, (C) – Amônia, (D) – Fósforo



A demanda bioquímica de oxigênio, por sua vez, reforça o diagnóstico de degradação ambiental nas áreas mais urbanizadas. Nos pontos de cabeceira, as médias de 1,83 mg/L (BE-09) e 2,78 mg/L (BE-01) indicam condições de menor impacto antrópico. Em contrapartida, nos pontos BE-30, BE-

45 e BE-50, os valores médios alcançaram níveis alarmantes, situando-se em 33,80 mg/L, 28,27 mg/L e 27,64 mg/L, respectivamente. No ponto BE-45, o valor máximo de 70,63 mg/L é particularmente expressivo, sugerindo aportes significativos de matéria orgânica, associados a despejos domésticos in natura e à ausência de tratamento adequado de esgotos.

Quanto às concentrações de amônia, os dados corroboram a degradação observada nos trechos urbanizados. As áreas de cabeceira, representadas pelos pontos BE-01 e BE-09, apresentaram médias reduzidas, de 0,07 mg/L e 0,29 mg/L, respectivamente. Já nos demais pontos, os valores foram significativamente mais elevados, com médias superiores a 9,0 mg/L e máximos que ultrapassam 17,0 mg/L, como evidenciado em BE-50. Tais concentrações refletem poluição recente por esgoto doméstico e a ocorrência de processos intensos de decomposição de compostos nitrogenados.

O fósforo total seguiu padrão semelhante, com teores modestos nos pontos de cabeceira, sendo 0,05 mg/L (BE-01) e 0,04 mg/L (BE-09) e, elevações marcantes nas áreas mais impactadas. Nos pontos BE-30, BE-45 e BE-50, observaram-se médias de 1,56 mg/L, 0,98 mg/L e 1,40 mg/L, respectivamente, com máximos superiores a 2,00 mg/L em BE-30 e BE-50. Essas concentrações revelam elevado potencial eutrofizante, característico de ambientes submetidos a despejos frequentes de esgotos e águas residuárias não tratadas.

A avaliação do Índice de Conformidade ao Enquadramento (ICE), representada nas Figuras 3 e 4 para as Classes 2 e 3, respectivamente, evidencia contrastes significativos entre os diversos pontos de monitoramento, refletindo a heterogeneidade no uso do solo e nas pressões exercidas ao longo da bacia hidrográfica. O ICE, ao quantificar o grau de aderência da qualidade da água aos padrões definidos pelo enquadramento, constitui ferramenta relevante para aferir a eficácia das políticas públicas de controle da poluição e para identificar áreas críticas que requerem intervenções imediatas.

O ponto BE-01, localizado no rio Araçá, em Camaragibe, destacou-se pelos elevados níveis de conformidade, alcançando 70,83 para a Classe 2 e 85,43 para a Classe 3. Inserido em uma região de baixa densidade urbana, próxima à nascente do rio Beberibe, esse ponto reflete um cenário ainda relativamente preservado, o que ressalta a importância estratégica da proteção das áreas de nascente para a manutenção da qualidade hídrica ao longo da bacia.

O ponto BE-09, situado no rio Beberibe, em Guabiraba, Recife, nas imediações da captação da COMPESA, também apresentou conformidades elevadas, com 85,47 na Classe 2 e 85,51 na Classe 3. Considerando tratar-se de área de captação para abastecimento público, tais resultados são particularmente relevantes e indicam que, até esse trecho, a bacia consegue manter padrões de qualidade compatíveis com os usos previstos. A ocupação esparsa no entorno, embora presente, requer vigilância contínua para garantir a integridade dos recursos hídricos.

Em contrapartida, os pontos BE-30, BE-45 e BE-50 demonstraram comprometimento severo da qualidade da água, com índices de conformidade extremamente reduzidos. Em BE-30, situado no rio Morno, foram observados valores de 17,99 para a Classe 2 e 18,08 para a Classe 3. Essa localidade, densamente urbanizada e carente de infraestrutura de saneamento, sofre com a descarga contínua de esgotos domésticos, impermeabilização do solo e ausência de controle ambiental eficaz.

O ponto BE-45, posicionado no Riacho Lava Tripa, ao longo da Avenida Presidente Kennedy, em Olinda, apresentou igualmente valores críticos, com 24,37 na Classe 2 e 27,89 na Classe 3. A elevada carga poluidora, oriunda de ocupações irregulares e da deposição inadequada de resíduos, contribui para o quadro de degradação hídrica. O ponto BE-50, por sua vez, localizado no rio Beberibe após a confluência com o Canal Vasco da Gama, na divisa entre Recife e Olinda, apresentou índices de 18,12 e 18,24 nas Classes 2 e 3, respectivamente. Trata-se de um trecho marcado pela elevada

densidade urbana e por significativos aportes de esgoto e águas pluviais contaminadas, fatores que comprometem de forma acentuada a qualidade da água.

Figura 3 – ICE estimado para os pontos de monitoramento da bacia do rio Beberibe, considerando a Classe 2

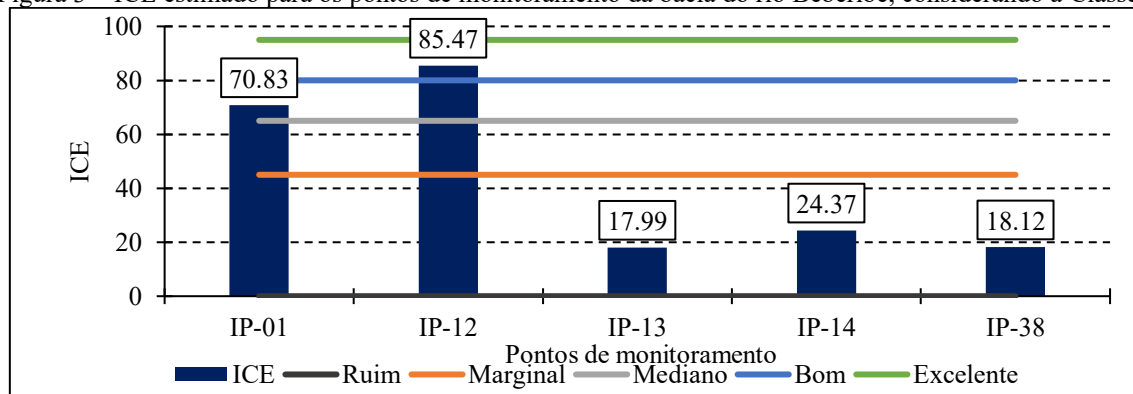
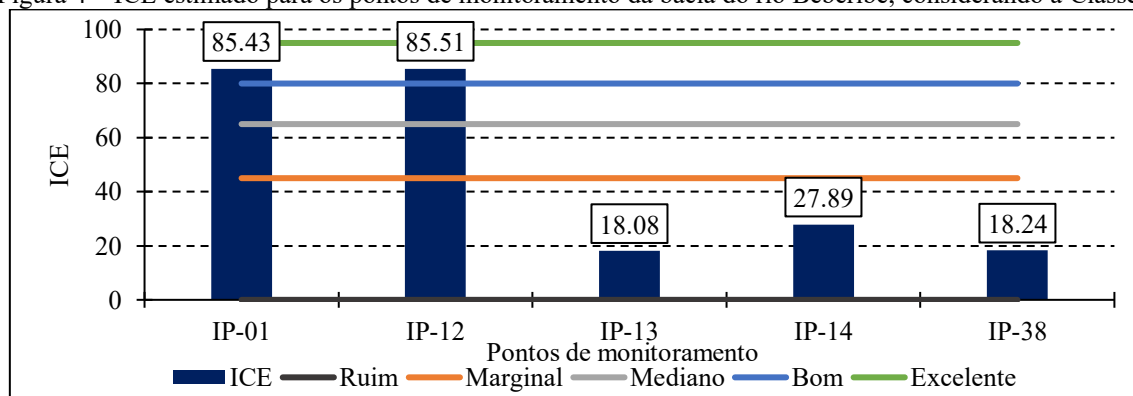


Figura 4 – ICE estimado para os pontos de monitoramento da bacia do rio Beberibe, considerando a Classe 3



Dessa forma, verifica-se que os índices de conformidade acompanham, em larga medida, o grau de urbanização e o padrão de uso e ocupação do solo ao redor dos pontos de monitoramento. Enquanto nas áreas de cabeceira a conformidade é elevada, com predominância de ocupações rarefeitas e menor carga poluidora, os trechos urbanos densamente ocupados evidenciam severa degradação ambiental. Esta constatação evidencia a necessidade de intervenções urgentes em infraestrutura de saneamento, planejamento urbano e recuperação ambiental, especialmente nos trechos médios e inferiores da bacia, de modo a promover a melhoria da qualidade da água e a consecução dos objetivos estabelecidos no enquadramento dos corpos hídricos.

Diversas pesquisas têm empregado o Índice de Conformidade ao Enquadramento (ICE) como instrumento analítico para avaliar a efetividade das políticas públicas voltadas à gestão da qualidade das águas e ao cumprimento das metas estabelecidas nos enquadramentos dos corpos hídricos. No estudo conduzido por Costa *et al.* (2022), o ICE foi aplicado em três importantes reservatórios da Bacia do Alto Tietê, a saber: Guarapiranga, Billings e Paiva Castro. Os resultados evidenciaram baixos níveis de conformidade em relação aos padrões de qualidade exigidos para os usos preponderantes, sobretudo o abastecimento público. Essa discrepância entre a qualidade observada e os limites estabelecidos na legislação reflete a intensa pressão antrópica sobre os sistemas aquáticos, ocasionada, principalmente, pela ocupação desordenada do solo e pelo lançamento inadequado de efluentes. Os autores ressaltam que a aplicação do ICE proporcionou uma visão abrangente das condições dos corpos hídricos, ao sintetizar informações complexas em indicadores objetivos,



revelando-se um instrumento essencial para subsidiar estratégias de gestão ambiental mais eficazes e sustentáveis.

De forma complementar, Hinata *et al.* (2023) analisaram 172 estações de monitoramento distribuídas em 19 bacias hidrográficas do estado do Rio Grande do Sul, no período compreendido entre 2015 e 2022. Os resultados demonstraram que aproximadamente 41% das estações apresentaram classificação do ICE no nível “marginal”, sobretudo em razão de parâmetros como fósforo total e oxigênio dissolvido, frequentemente associados a fontes difusas e pontuais de poluição. As regiões submetidas a maior pressão antrópica, caracterizadas por intensa atividade agropecuária e despejo de efluentes domésticos não tratados, demandam, segundo os autores, a adoção de políticas públicas mais rigorosas e ações de mitigação que promovam a redução das cargas poluentes. Assim, tais medidas são fundamentais para a melhoria da qualidade da água e para assegurar o cumprimento das metas de enquadramento dos corpos hídricos, conforme preconizado pelos instrumentos de gestão dos recursos hídricos no Brasil.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise da qualidade da água na bacia do rio Beberibe, com base em parâmetros físico-químicos e no Índice de Conformidade ao Enquadramento, evidenciou contrastes marcantes entre as áreas de cabeceira e os trechos urbanos. As regiões menos impactadas, próximas às nascentes, apresentaram melhores condições ecológicas, com alta concentração de oxigênio dissolvido, baixos níveis de nutrientes e maior conformidade com os enquadramentos legais. Por outro lado, os pontos inseridos em zonas urbanizadas revelaram elevados índices de poluição, baixa capacidade de autodepuração e comprometimento da integridade dos ecossistemas aquáticos.

Os referidos resultados demonstram a estreita relação entre o uso do solo e a qualidade da água, confirmando a utilidade do ICE como ferramenta de avaliação ambiental. A conservação das áreas mais preservadas e a reabilitação dos trechos degradados demandam investimentos em saneamento, ordenamento territorial e recuperação dos corpos hídricos. Portanto, a adoção de políticas públicas integradas, orientadas pela sustentabilidade e pela gestão eficiente dos recursos hídricos, mostra-se essencial para a melhoria da qualidade ambiental da bacia e para a promoção da resiliência ecológica.

**AGRADECIMENTOS** - Os autores expressam seus agradecimentos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio, código de financiamento 001, e à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pelo fomento à pesquisa e apoio financeiro por meio da concessão de bolsas de doutorado. A CAPES pela concessão ao primeiro autor (Processo nº 88887.814388/2023-00), à terceira autora (Processo nº 88887.134583/2025-00) e ao quarto autor (Processo nº 88887.134143/2025-00). A FACEPE pela concessão à segunda autora (Processo IBPG-1279-3.01/22).

## REFERÊNCIAS

CCME. (2003). Canadian Council of Ministers of the Environment. “*Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life*”. CCME Water Quality Index 1.0 User’s Manual. Winnipeg. 146 p.

COSTA, P.; BARROSO, G. R.; OLIVEIRA, K. L.; STARLING, M. C. V. M.; OLIVEIRA, S. (2022). “*Dinâmica espaçotemporal da qualidade das águas superficiais de dois grandes reservatórios de usinas hidrelétricas brasileiras*”. Engenharia Sanitária e Ambiental, 27(5), p. 893–907. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220210233>.

CPRH. (2021). Agência Estadual de Meio Ambiente. “*Relatório de monitoramento da qualidade da água de bacias hidrográficas do estado de Pernambuco*”. Governo do estado de Pernambuco.

GREGGIO, N.; GIAMBASTIANI, B. M. S.; MOLLEMA, P.; LAGHI, M.; CAPO, D.; GABBIANELLI, G.; ANTONELLINI, M.; DINELLI, E. (2020). “*Assessment of the main geochemical processes affecting surface water and groundwater in a low-lying coastal area: Implication for water management*”. Water, 12, 1720. DOI: <https://doi.org/10.3390/w12061720>.

HINATA; S. S.; KALISKI; A. D.; WOLFF; C. B.; SCOTTÁ; F. C.; SCHUSTER; R. C.; SOUZA; W. L. Z. M.; CARDONE; L. B. (2023). “*Situação de corpos hídricos em bacias hidrográficas do Rio Grande do Sul sob a perspectiva do Índice de Conformidade ao Enquadramento (ICE)*”. Revista de Gestão de Água da América Latina, 20, e23. DOI: <https://doi.org/10.21168/rega.v20e23>.

IBGE. (2022). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. “*Censo Brasileiro de 2022*”. IBGE. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/22827-censo-demografico-2022.html?edicao=35938>. Acesso em: 29 nov. 2023.

KARR, J. R.; LARSON, E. R.; CHU, E.W. (2022). “*Ecological integrity is both real and valuable*”. Conservation Science and Practice, vol. 4, pp. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1111/csp2.583>.

KUMWIMBA, M. N.; HUANG, J. L.; DZAKPASU, M.; AJIBADE, F. O.; LI, X. Y.; EDMOND, S.; GUADIE, A.; ŞENEL, R.; MUYEMBE, D. K. (2023). “*Enhanced nutrient removal in agro-industrial wastes-amended hybrid floating treatment wetlands treating real sewage: Laboratory microcosms to field-scale studies*”. Chemosphere, 330, 138703. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138703>.

ONU – Organização das Nações Unidas (2018). “*Universalização do saneamento está lenta demais na maior parte dos países*”. [S.l.], 2018.

STEPHENSON, K.; SHABMAN, L.; SHORTLE, J.; EASTON, Z. (2022). “*Confronting our Agricultural Nonpoint Source Control Policy Problem*”. Journal of the American Water Resources Association (JAWR), vol. 58, no. 4. DOI: <https://doi.org/10.1111/1752-1688.13010>.

WAN, L.; WANG, H. (2021). “*Control of urban river water pollution is studied based on SMS*”. Environmental Technology & Innovation, volume 22, 101468. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101468>.

ZHANG, J.; ZOU, T.; LAI, Y. (2021). “*Novel method for industrial sewage outfall detection: Water pollution monitoring based on web crawler and remote sensing interpretation techniques*”. Journal of Cleaner Production, volume 312, 127640. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127640>.