

Modelagens de qualidade da água como ferramenta de avaliação de capacidade de suporte de reservatórios – aplicação ao Reservatório Amador Aguiar I

Diana Maria Cancelli¹, Cynara de Lourdes da Nóbrega Cunha², Helder Rafael Nocko³, André Luciano Malheiros⁴, Sylvio Luiz Andreozzi⁵, Nayara Teodoro Mota⁶ & Hygor Evangelista Siqueira⁷

Resumo: Este trabalho avalia a capacidade de suporte do reservatório da UHE Amador Aguiar I (MG) frente aos múltiplos usos da água e atividades de piscicultura. A avaliação realizada integrou modelagens hidrodinâmicas e de qualidade da água realizadas com o sistema de modelos SisBaHiA, e complementadas pelo modelo empírico de Salas e Martino (1991) para fósforo total. Monitoramentos realizados entre novembro de 2023 e novembro 2024 fundamentaram a calibração de cenários atuais e de prognóstico futuro. O fósforo total foi identificado como o parâmetro limitante para manutenção do atendimento aos limites estabelecidos para corpos hídricos de classe 2 com tempos de residência intermediários (CONAMA 357/2005), e os resultados indicaram que o reservatório possui capacidade de suportar cargas da ordem de 3,5 vezes as atualmente recebidas. Observou-se que há baixa probabilidade de eutrofização, uma vez que mesmo com concentrações de fósforo da ordem de 0,05 mg/L, as concentrações de clorofila-a permanecem baixas. Por fim, a aplicação da metodologia aqui apresentada mostrou-se eficaz para a gestão ambiental e planejamento de recursos hídricos para as áreas adjacentes ao reservatório.

Abstract: This study evaluates the carrying capacity of the Amador Aguiar I Hydroelectric Power Plant (MG) reservoir in relation to multiple water uses and fish farming activities. The evaluation integrated hydrodynamic and water quality modeling performed with the SisBaHiA model system, complemented by the empirical model of Salas and Martino (1991) for total phosphorus. Monitoring carried out between November 2023 and November 2024 provided the basis for calibrating current and future forecast scenarios. Total phosphorus was identified as the limiting parameter for maintaining compliance with the limits established for class 2 water bodies with intermediate residence times (CONAMA 357/2005), and the results indicated that the reservoir has the capacity to support loads approximately 3.5 times those currently received. It was observed that there is a low probability of eutrophication, since even with phosphorus concentrations of approximately 0.05 mg/L, chlorophyll-a concentrations remain low. Finally, the application of the methodology presented here proved effective for environmental management and water resource planning for the areas adjacent to the reservoir.

Palavras-Chave: capacidade de suporte; modelagem da qualidade da água; fósforo total; reservatórios tropicais.

Keywords: carrying capacity; water quality modeling; total phosphorus; tropical reservoirs

INTRODUÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO

A gestão sustentável dos recursos hídricos requer um equilíbrio entre disponibilidade hídrica e manutenção de sua qualidade, o que é um grande desafio em áreas que sofrem pressão antrópica em função dos múltiplos usos da água. O reservatório da Usina Hidrelétrica (UHE) Amador Aguiar I (eixo nas coordenadas 18°47'25"S e 48°08'50"W), localizado no Rio Araguari entre os municípios de

¹) EnvEx Engenharia e Consultoria – diana.cancelli@envexengenharia.com.br

²) Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Paraná – cynaracunha@gmail.com

³) EnvEx Engenharia e Consultoria – helder@envexengenharia.com.br

⁴) EnvEx Engenharia e Consultoria – andre@envexengenharia.com.br

⁵) CBH Araguari, Instituto de Geografia, Geociências e Saúde Coletiva - Universidade Federal de Uberlândia – andreozzi@ufu.br

⁶) ABHA Gestão de Águas – nayara.mota@agenciaabha.com.br

⁷) ABHA Gestão de Águas – hygor.siqueira@agenciaabha.com.br

Uberlândia, Araguari e Indianópolis, no estado de Minas Gerais é um exemplo desse conflito entre pressão antrópica e necessidade de manutenção de qualidade. As áreas adjacentes ao reservatório são caracterizadas pela expansão de áreas urbanas e agrícolas e a presença de indústrias tem gerado a necessidade de expansão do sistema de abastecimento público e um aumento das demandas hídricas consuntivas. Além disso, há um aumento da carga de poluentes relacionado aos lançamentos de efluentes industriais, atividades agrícolas e de piscicultura em tanques-rede (que contribui diretamente para a introdução de nutrientes no sistema).

Considerando o exposto acima, este trabalho mostra os resultados das modelagens de qualidade da água (e análises complementares) para o reservatório da UHE Amador Aguiar I (1), no âmbito do Estudo de Capacidade de Suporte realizado para o Comitê da Bacia Hidrográfica (CBH) do Rio Araguari e Associação Multissetorial de Usuários de Recursos Hídricos de Bacias Hidrográficas (ABHA).

Com as modelagens realizadas foi possível avaliar a capacidade do reservatório em assimilar as cargas afluentes de nutrientes, sem comprometer suas funções ecológicas e socioeconômicas, tendo como premissa garantir o atendimento aos limites estabelecidos para corpos hídricos de Classe 2 pela Resolução CONAMA 357/2005 e pela Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH 08/2022, para os parâmetros Oxigênio Dissolvido (OD), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Amônia, Nitrato, Fósforo Total e Clorofila-a, como indicador da presença de fitoplâncton.

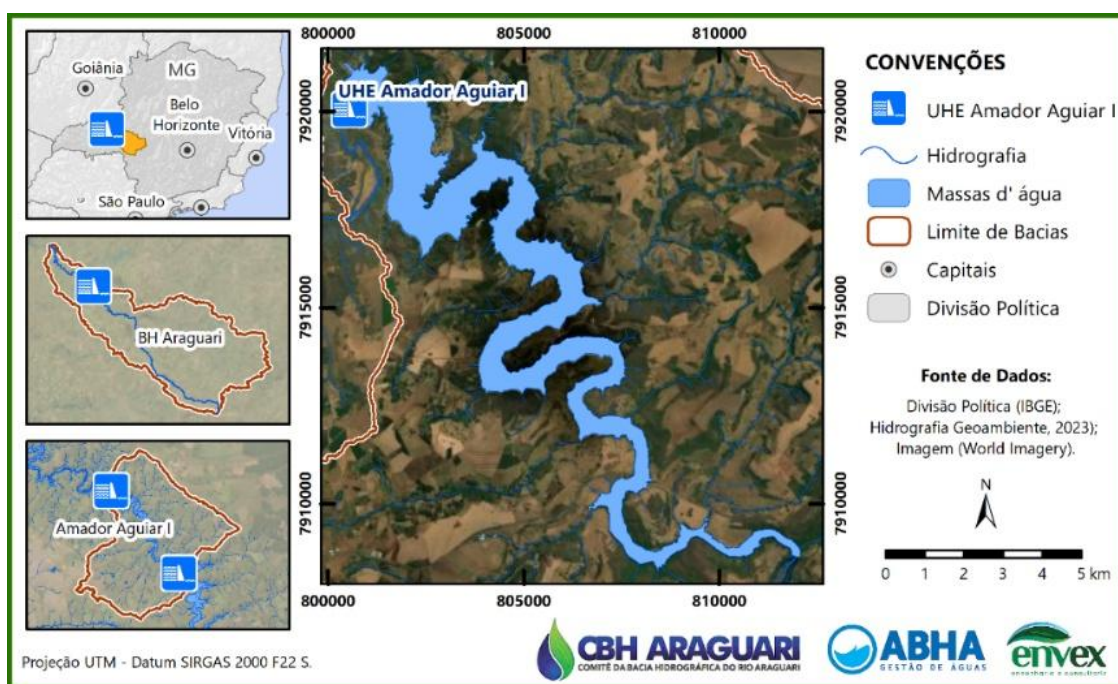


Figura 1 – Localização do reservatório da UHE Amador Aguiar I.

METODOLOGIA

A análise de capacidade de suporte do reservatório UHE Amador Aguiar I foi realizada por meio de modelagens matemáticas, incluindo diagnóstico e prognóstico. Para tanto, foram utilizados os módulos de hidrodinâmica e de qualidade da água do sistema de modelos SisBaHiA® – Sistema

⁸ O SisBaHiA® é um sistema de modelos computacionais registrado pela Fundação COPPETEC, órgão gestor de convênios e contratos de pesquisa do COPPE/UFRJ - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Desde 1987 é continuamente ampliado e aperfeiçoado. É um modelo do tipo 2DH em que são consideradas variações nas duas direções horizontais, mantendo os valores constantes (promediados) na vertical, o que

Base de Hidrodinâmica Ambiental. O padrão de circulação foi obtido utilizando o modelo hidrodinâmico bidimensional (2DH), considerado adequado para representar a geometria e as reentrâncias do reservatório. Para a implementação do modelo hidrodinâmico – requisito para as modelagens de qualidade da água, foram utilizados dados batimétricos, dados de intensidade e direção do vento, nível d'água, vazões afluentes e defluentes do Rio Araguaçu e de suas sub-bacias adjacentes – incluindo retiradas por meio de captação e afluências por meio de lançamento de efluentes. Após a calibração do modelo, validada por meio dos dados de elevação de nível d'água, foram construídos cenários contemplando uma série anual de vazões diárias críticas ($Q_{7,10}$). O modelo hidrodinâmico tem como resultados as velocidades de corrente, níveis e vazões espacialmente distribuídos, necessários para a definição dos transportes advectivos e dispersivos dos poluentes no reservatório. Maiores detalhes sobre as modelagens hidrodinâmicas são encontrados em Cancelli et al (2025).

Uma vez definidos os campos de velocidade, foram implementadas e executadas as modelagens de qualidade da água. Para tanto, foi empregado o modelo de qualidade de água promediado na vertical (2DH); este módulo do SisBaHiA[®] soluciona as equações de balanço de massa e simula as interações e reações cinéticas que ocorrem entre os diversos escalares não-conservativos, permitindo analisar as variações espaciais e temporais dos parâmetros simulados: Temperatura, OD, DBO, Amônia, Nitrato, Fósforo Total e Clorofila-a. O modelo de qualidade da água foi calibrado com dados coletados em pontos distribuídos ao longo do reservatório, com o ajuste dos coeficientes biogeoquímicos. Com o modelo calibrado foram realizadas simulações de diferentes aportes de carga e mudanças de uso do solo da bacia contribuinte, constituindo a base analítica para a determinação da capacidade de suporte do reservatório. Foram realizadas análises complementares para a definição da capacidade de suporte do reservatório utilizando o modelo concentrado de Vollenweider (1976), com as adaptações realizadas por Salas e Martino (1991), com foco em possibilidade de eutrofização e usando no parâmetro Fósforo Total como indicador.

Dados utilizados

O conjunto de dados necessários para realizar as modelagens de qualidade da água compreende: resultados das simulações hidrodinâmicas; valores dos parâmetros de qualidade da água para locais de afluência ao reservatório e dos efluentes lançados; radiação solar, umidade relativa do ar e temperatura do ar. Os dados utilizados nas modelagens encontram-se descritos na Tabela 1; todos as medições foram realizadas no período de novembro de 2023 a novembro de 2024.

Variável	Descrição e Aplicação no Modelo	Fonte dos Dados
Hidrodinâmica do reservatório	Campos de velocidades de corrente calculados previamente.	Resultados do modelo hidrodinâmico, apresentados em Cancelli et al (2025)
Qualidade da água do reservatório	Concentrações de OD, DBO, Amônia, Nitrato, Fósforo Total e Clorofila-a e Temperatura. Dados do ponto P1 foram usados como condição de contorno de entrada, e os dados dos pontos P2 a P7 foram usados para calibração.	Monitoramento realizado em 7 pontos (P1 a P7) distribuídos ao longo do reservatório (diversas profundidades de coleta) em duas campanhas para este estudo, localização na Figura 2.
Aporte de cargas das sub-bacias adjacentes	Cargas de nutrientes e matéria orgânica das bacias adjacentes convertidas em concentrações e impostas nos rios afluentes.	Obtidas por modelo chuva-vazão e de aporte de cargas aplicado às sub-bacias adjacentes ao reservatório.
Dados de qualidade dos efluentes	Concentrações de parâmetros de qualidade dos efluentes industriais tratados, lançados no	Dados públicos, disponíveis em Pareceres Únicos do SIAM e em Pöyry (2018).

permite observar variações espaciais nos resultados, tornando a resolução do problema menos complexa e fornecendo resultados de boa qualidade. Maiores informações sobre o SisBaHiA[®] podem ser encontradas em <http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/>

Variável	Descrição e Aplicação no Modelo	Fonte dos Dados
	reservatório pelas empresas AMBEV S.A. e LD Celulose S.A.	
Dados Meteorológicos	Registros horários de radiação solar, temperatura e umidade relativa, necessários para simular os processos biológicos e a temperatura.	Dados da estação Araxá (INMET - A505)

Tabela 1 – Descrição dos dados utilizados nas modelagens de qualidade da água.

MODELAGENS DE QUALIDADE DA ÁGUA

O primeiro passo para implementação das modelagens é a discretização do domínio espacial do reservatório em uma grade numérica sobre a qual os dados de batimetria são interpolados. Na sequência são inseridas as demais informações necessárias para as simulações hidrodinâmicas. A Figura 3 mostra a grade numérica de elementos finitos (com 1002 elementos e 4561 nós); a Figura 4 mostra as persistências de baixas velocidades de corrente ($< 0,01$ m/s) – as maiores ocorrem nas reentrâncias e regiões mais profundas.

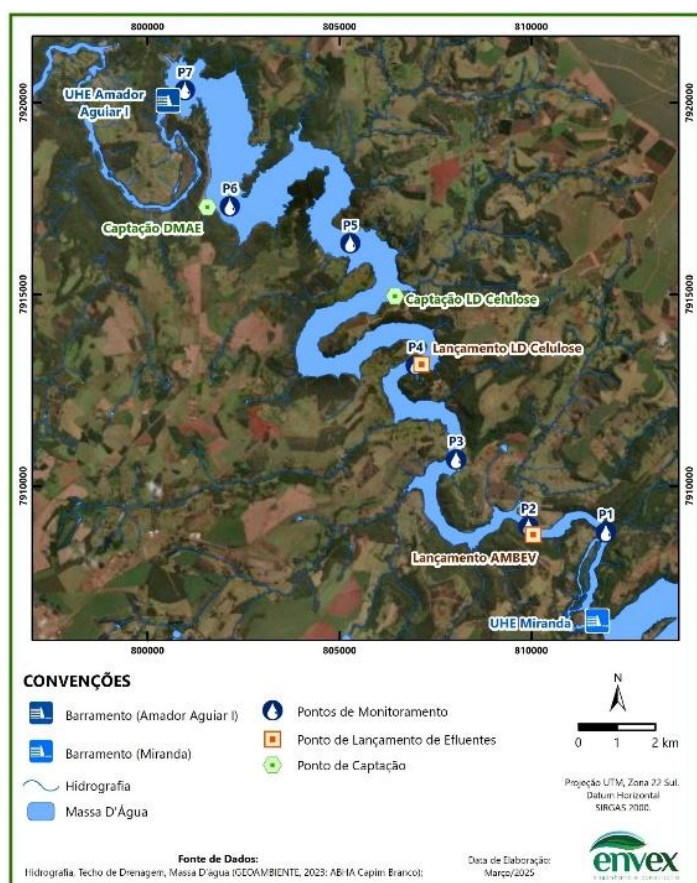


Figura 2 – Localização dos pontos de monitoramento de qualidade da água.

Na sequência procedeu-se a implementação do modelo de qualidade da água. Para tanto são inseridos os dados de concentrações na entrada do reservatório (ponto P1) além dos aportes de cargas (convertidos em concentrações) provenientes do escoamento superficial das sub-bacias, dados de radiação solar, temperatura e umidade relativa do ar, concentrações presentes nos efluentes industriais

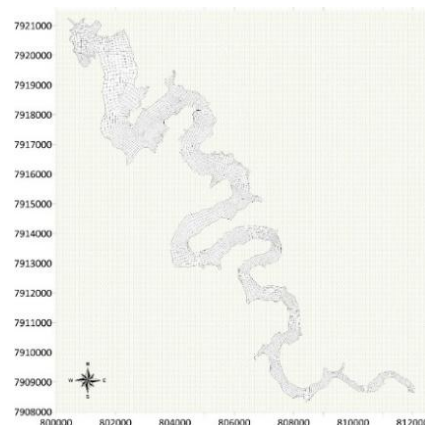


Figura 3 – Malha de elementos finitos utilizada para as simulações.

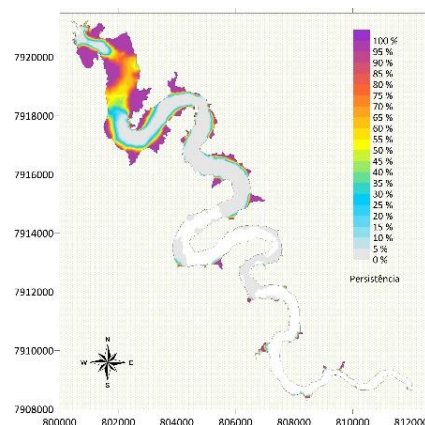


Figura 4 – Persistência de velocidades de corrente $< 0,01$ m/s – Cenário C1 ($Q_{7,10}$).

tratados e lançados no corpo hídrico; os parâmetros modelados foram temperatura, OD, DBO, Amônia, Nitrato, Fósforo Total e Clorofila-a.

Para fundamentar as avaliações de capacidade de suporte, foram estruturados cenários de simulação que consideram baixas vazões com diferentes aportes de cargas de nutrientes e matéria orgânica, conforme sumarizado na Tabela 2.

Cenário	Descrição	Vazões do rio Araguari	Captação para abastecimento público (reservatório)	Aporte de cargas das sub-bacias
C0	Calibração do modelo	Vazões diárias (nov/2023 a dez/2024)	Atual (2,0 m³/s)	Atuais
C1	Condição crítica de vazões atual	Série diária vazões mínimas (Q7,10)	Atual (2,0 m³/s)	Atuais
C2	Condição crítica futura	Série diária vazões mínimas (Q7,10)	Prevista para o futuro (6,0 m³/s)	Aumentadas (projeção de aumento de atividade agrícola e adensamento urbano)

Tabela 2 – Cenários de simulação de qualidade da água.

O cenário C0 foi usado para fins de calibração, utilizando dados medidos (tanto hidrodinâmica quanto qualidade da água); a hidrodinâmica foi calibrada com níveis d'água (Cancelli et al (2025)). Para qualidade da água, na calibração foram ajustados os coeficientes associados às reações cinéticas e biogeoquímicas; a validação se deu pela comparação temporal de dados medidos (2 campanhas em 3 profundidades) com dados simulados. A Figura 5 mostra a comparação entre os dados de OD e Temperatura medidos e simulados no ponto P6 (região mais profunda, próxima a barragem). Na Figura 6 é possível observar uma comparação entre os valores médios de OD medidos com os valores mínimos, médias e máximos simulados nos 6 pontos monitorados. Observa-se que o modelo reproduz adequadamente as tendências das concentrações medidas ao longo do reservatório, indicando uma calibração satisfatória.

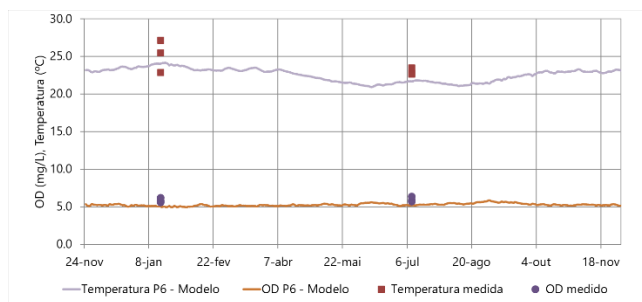


Figura 5 – Valores de Temperatura e OD simulados e dados medidos no ponto P6 para o cenário C0 (calibração).

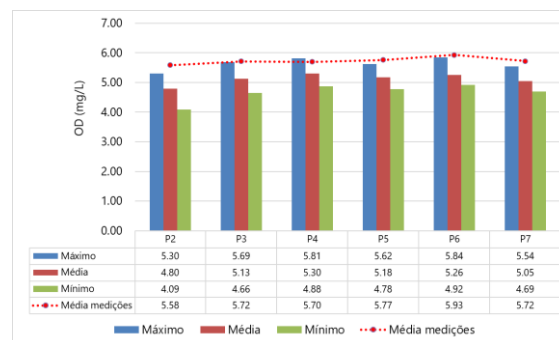


Figura 6 – Mínima, média e máxima dos valores de OD obtidos pelo modelo e média das medições de campo em cada ponto para o cenário C0 (calibração).

O cenário C1 representa a situação atual (diagnóstico) de aporte de cargas e demandas hídricas atuais associadas a baixas vazões no rio Araguari. O cenário 2 representa uma situação hipotética futura (prognóstico), com alterações significativas no uso do solo das bacias adjacentes, sendo possível avaliar o impacto sobre a qualidade da água do reservatório (e em sua capacidade de suporte) considerando que: áreas hoje florestadas e de cerrado passam a ser ocupadas por agricultura; a população animal e a população humana serão incrementadas em 50%; a demanda hídrica será igual

à máxima outorgável. Para o estudo completo foi elaborado um modelo para estimativas de cargas de nutrientes e carbono juntamente com um modelo do tipo chuva-vazão; ambos foram calibrados para uma sub-bacia adjacente ao reservatório e extrapolados para as demais. As simulações de qualidade da água foram executadas com passo de tempo de 60 segundos.

RESULTADOS E ANÁLISES COMPLEMENTARES

Foram avaliados resultados espaciais, instantâneos e persistências (Figura 7 e Figura 9) para os dois cenários, C1 e C2. Em termos de concentrações, os resultados para os cenários C1 e C2 foram semelhantes; mesmo com o aumento dos aportes de carga (cenário C2), as variações nas concentrações de nutrientes foram pequenas, não alterando significativamente a qualidade da água. O único parâmetro que ficou em desacordo com o estabelecido pela Resolução CONAMA 357/2005 para classe 2 foi o OD, que apresentou uma tendência de oscilação em torno do seu limite mínimo (5,0 mg/L). Quanto aos nutrientes, as maiores concentrações de Fósforo Total foram da ordem de 0,03 mg/L (abaixo de seu limite de 0,05 mg/L para ambientes intermediários); o máximo de Nitrogênio Total foi menor de 1,0 mg/L – valor muito menor do que o limite estabelecido para o Nitrato (10 mg/L), que é uma de suas parcelas. Todos os demais parâmetros atenderam seus respectivos limites em todos os cenários. Isso acontece porque o principal aporte de vazão ao reservatório, e por consequência de cargas, se dá por meio do Rio Araguari (vazão defluente do reservatório da UHE Miranda), o que significa que a qualidade da água do reservatório da UHE Amador Aguiar I é fortemente dependente e influenciada pela qualidade da água do reservatório da UHE Miranda, que se encontra a montante (1).

Considerando que, mesmo com um maior aporte de cargas, a capacidade de suporte do reservatório não foi atingida, entendida como a quantidade máxima de nutrientes/substâncias que o ambiente pode suportar sem comprometer a qualidade da água e o equilíbrio ambiental, foram realizadas análises complementares. Para tanto, adotou-se o parâmetro Fósforo Total como nutriente limitante; a carga máxima suportada pelo reservatório foi calculada por meio do modelo concentrado de Salas e Martino (1991), uma adaptação do modelo de Vollenweider (1976), considerando a concentração limite de Fósforo Total para classe 2, ou seja, 0,05 mg/L. Assim, para que o reservatório tenha uma concentração de fósforo de 0,05 mg/L, ele precisa receber uma carga máxima equivalente a cerca de 3,5 vezes àquela atualmente recebida. Essa análise foi realizada considerando que as ordens de grandeza dos tempos de residência e das concentrações médias obtidas pelo modelo concentrado são comparáveis àquelas obtidas pelo SisBaHiA®.

Com o objetivo de verificar o impacto do aporte de fósforo 3,5 vezes maior no reservatório, um novo cenário de qualidade da água foi implementado no SisBaHiA®. A carga de fósforo aumentada (cerca de 512 toneladas/ano) foi distribuída entre as contribuições do rio Araguari, bacias adjacentes e liberação de nutrientes na coluna d'água devido à atividade de piscicultura em tanques-rede. As cargas afluentes consideradas no cenário C2 foram aumentadas em 50%, elevando consideravelmente o aporte por meio do rio Araguari. A parcela restante foi introduzida sob a forma de carga interna, associada diretamente à piscicultura (conforme Ferreira Jr (2011)): considerou-se que as áreas de tanques-rede atualmente existentes no reservatório (cerca de 0,334 km²) emitiriam 0,876 kg/m²/ano de Fósforo Total, resultando em cerca de 292,5 toneladas/ano lançadas na coluna d'água. As novas cargas de Fósforo Total foram convertidas em concentrações e inseridas no modelo juntamente com as demais condições de contorno já utilizadas no cenário C2.

A simulação desse cenário adicional mostrou um aumento acentuado nas concentrações de Fósforo Total e redução de OD (juntamente com aumento de concentrações de DBO e nitrogênio total) (Figura 10 e Figura 11), sendo estes os únicos parâmetros que apresentaram não conformidades pontuais com os limites legais. No entanto, as concentrações de Clorofila-a não sofreram alterações

significativas, permanecendo em patamares baixos, confirmando baixa probabilidade de proliferação de algas e consequente eutrofização.

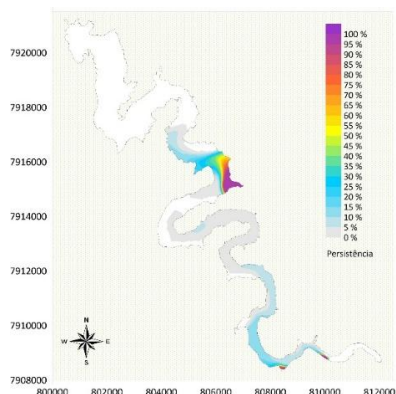


Figura 7 – Persistência de OD < 4,5 mg/L – cenário C2.

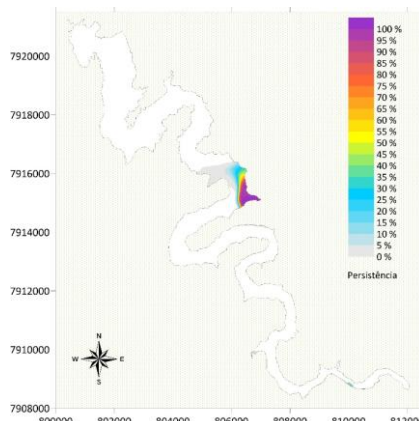


Figura 8 – Persistência de Fósforo Total < 0,03 mg/L – cenário C2.

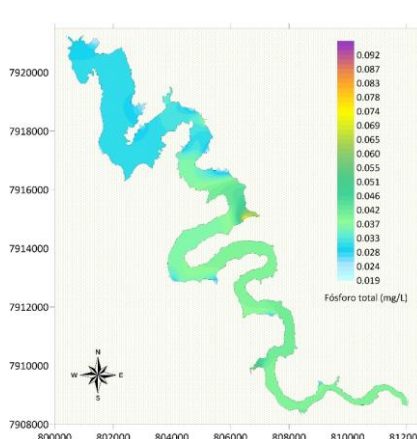


Figura 9 – Concentração de Fósforo Total no dia 30/04/2024 – cenário C2.

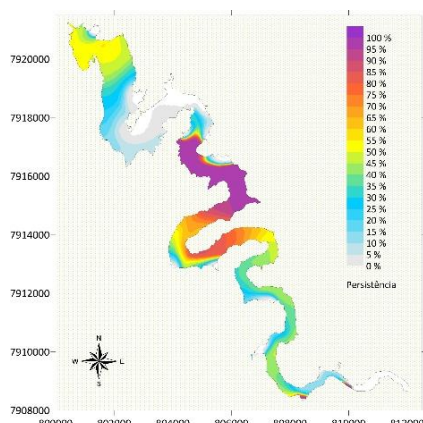


Figura 10 – Persistência de OD < 4,5 mg/L – cenário aporte de carga máxima de Fósforo Total.

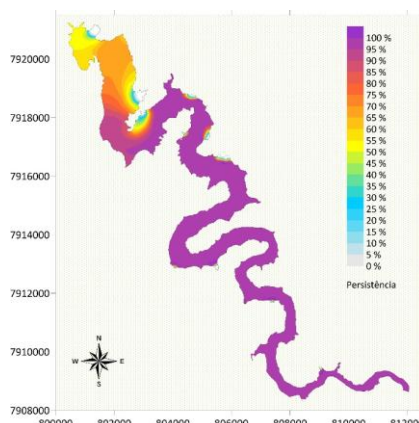


Figura 11 – Persistência de Fósforo Total < 0,03 mg/L – cenário aporte de carga máxima de Fósforo Total.

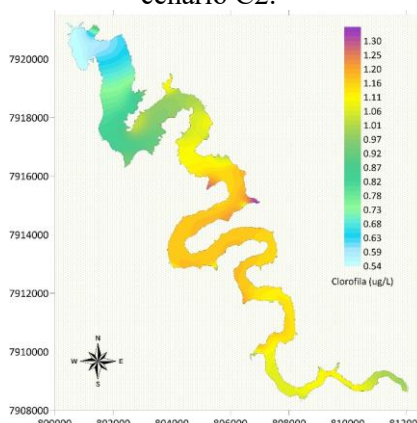


Figura 12 – Concentração de Clorofila-a no dia 30/04/2024 – cenário aporte de carga máxima de Fósforo Total.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As simulações de capacidade de suporte mostraram que o reservatório da UHE Amador Aguiar I é capaz de assimilar uma carga de fósforo cerca de 3,5 vezes maior (512 toneladas/ano) do que a atualmente recebida antes de atingir os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 357/2005 para classe 2. O parâmetro Fósforo Total foi definido como nutriente limitante considerando questões relacionadas com eutrofização e as condições de uso do solo do entorno. Verificou-se que a qualidade da água do reservatório é fortemente dependente das condições de montante, ou seja, das águas provenientes do reservatório da UHE Miranda. Embora o cenário de carga máxima de Fósforo Total tenha indicado reduções das concentrações de OD, as concentrações de Clorofila-a ainda são baixas, sugerindo pouca probabilidade de eutrofização.

Por fim, a aplicação da metodologia aqui apresentada, integrando os modelos do SisBaHiA com um modelo concentrado, mais simplificado, mostrou-se eficaz para representar a dinâmica do reservatório e validar a capacidade de suporte do reservatório, demonstrando serem adequadas para a gestão ambiental e planejamento do uso dos recursos hídricos nas áreas adjacentes ao reservatório.

AGRADECIMENTOS

As modelagens apresentadas neste artigo são parte integrante do estudo denominado "Monitoramento fluviométrico, batimetria, diagnóstico de qualidade da água e estudo da capacidade de suporte do reservatório artificial e área de influência da Usina Hidrelétrica Amador Aguiar I (Capim Branco I)" desenvolvido pela EnvEx Engenharia e Consultoria Ltda. por meio do Contrato ABHA 007/2023, em conformidade com o Ato Convocatório 002/2023. As despesas e obrigações foram suportadas por recursos oriundos da cobrança pelo uso dos recursos hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Araguari, previstas no Plano Plurianual de Aplicação – PPA. Assim, agradecemos ao CBH Araguari e à ABHA pela revisão e por permitirem a publicação de parte do conteúdo desenvolvido do referido estudo.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO MULTISSETORIAL DE USUÁRIOS DE RECURSOS HÍDRICOS DE BACIAS HIDROGRÁFICAS (ABHA). *Estudo da capacidade de suporte do reservatório artificial e área de influência da Usina Hidrelétrica Amador Aguiar I (Capim Branco I)*. Araguari: ABHA, 2024.

CANCELLI, D. M.; CUNHA, C. L. N.; NOCKO, H. R.; MALHEIROS, A. L.; MOTA, N. T.; SIQUEIRA, H. E. *Modelagens de hidrodinâmica e de tempos de residência como ferramenta para indicação de melhores áreas para piscicultura em reservatórios: aplicação ao reservatório Amador Aguiar I*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 26., 2025, Vitória. Anais [...]. Vitória: [s. n.], 2025. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=17475>. Acesso em: 12 abr. 2026.

FERREIRA JUNIOR, M. G. *Uso de modelagem na avaliação da capacidade de suporte de reservatórios com projetos de aquicultura, tendo o fósforo como fator limitante*. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Oceânica) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

PÖYRY TECNOLOGIA. *Estudo de autodepuração de efluente tratado: LD Celulose S.A. Fábrica de celulose solúvel em Indianópolis e Araguari – MG*. São Paulo: Pöyry Tecnologia, 2018. Disponível em: <https://www.idbinvest.org/sites/default/files/2019-09/Anexo%20V%20-%20Estudo%20de%20Dispers%C3%A3o%20H%C3%ADrica.pdf>. Acesso em: 12 abr. 2026.

ROSMAN, P. C. C. (ed.). Referência técnica do SisBaHiA: *Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental*. Rio de Janeiro: COPPE; UFRJ, 2025. Disponível em: https://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/assets/downloads/SisBaHiA_RefTec_v12b.pdf. Acesso em: 12 abr. 2026.

SALAS, H. J.; MARTINO, P. *A simplified phosphorus trophic state model for warmwater tropical lakes*. Water Research, [S. l.], v. 25, n. 3, p. 341-350, 1991.

VOLLENWEIDER, R. A. *Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication*. Memorie dell'Istituto Italiano di Idrobiologia, Pallanza, v. 33, p. 53-83, 1976.