

Acoplamento Dinâmico de Rios e Corpos Receptores como Ferramenta de Suporte à Gestão Integrada de Recursos Hídricos

Verônica Silveira de Andrade¹ ; Paulo Cesar Colonna Rosman² & José Paulo Soares de Azevedo³

Abstract: The management of water resources in coastal basins presents significant challenges due to the complex interactions between riverine and estuarine systems, especially in densely urbanized regions. This work presents a methodology for the dynamic coupling of water quality models between one-dimensional (1D) representations of tributary rivers and multidimensional (2DH) representations of receiving water bodies. Implemented in the SisBaHiA (Environmental Hydrodynamics Base System), the methodology allows bidirectional communication of hydrodynamic and water quality parameters at each simulation time step. The approach was validated through theoretical tests and applied to Guanabara Bay, comparing results between traditional 2DH simulations and the proposed 2DH+1D dynamic coupling. Results indicate greater accuracy in simulating constituents transport and reactions, particularly at river-estuary interfaces. This integrated modeling framework enhances the capacity to diagnose and predict environmental conditions, offering valuable support for decision-making by water resource management entities.

Resumo: A gestão de recursos hídricos em bacias costeiras enfrenta desafios relevantes devido à complexidade das interações entre sistemas fluviais e estuarinos, especialmente em regiões urbanizadas. Este trabalho apresenta uma metodologia de acoplamento dinâmico de modelos de qualidade de água entre representações unidimensionais (1D) dos rios afluentes e representações multidimensionais (2DH) dos corpos receptores. A metodologia foi implementada no SisBaHiA (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental), permitindo a troca bidirecional de dados hidrodinâmicos e de qualidade de água a cada passo de tempo da simulação. Após validações com testes teóricos, foi aplicada na Baía de Guanabara, comparando os resultados entre a modelagem tradicional 2DH e o acoplamento dinâmico 2DH+1D. Os resultados demonstram maior precisão na simulação do transporte e das reações dos constituintes, sobretudo nas zonas de interface rio-estuário. O modelo integrado oferece suporte robusto às análises diagnósticas e prognósticas, constituindo uma ferramenta estratégica para gestores de recursos hídricos diversos.

Palavras-Chave – modelagem computacional, acoplamento modelos, qualidade de água

INTRODUÇÃO

A gestão integrada de recursos hídricos em regiões costeiras demanda abordagens que representem adequadamente as interações complexas entre bacias hidrográficas e corpos receptores, como estuários, baías e lagunas. Essas regiões, muitas vezes densamente urbanizadas, sofrem pressões significativas em função de lançamentos de efluentes, alterações no uso do solo e fenômenos naturais como marés, intrusão salina e variações de níveis e correntes no mar devido aos fenômenos meteorológicos.

Dada a considerável variação nas escalas espaciais e nas características dos ambientes hídricos, muitas vezes se faz necessário o acoplamento de modelos com diferentes resoluções espaciais. Nesse sentido, o acoplamento de modelos, em que um modelo unidimensional, 1D, representa o escoamento

1) Engenharia na ABdoB - Associados Baías do Brasil, +55 24 98171-5423, veronica@abdob.com.br

2) Professor Titular do Departamento de Recursos Hídricos e Meio Ambiente (Escola Politécnica) da UFRJ, E-mail: pccrosman@ufrj.br

3) Professor Associado Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFR. zepaulo@coc.ufrj.br

dos rios e um modelo, bidimensional, 2D, ou tridimensional, 3D, representa o corpo hídrico receptor, torna-se uma abordagem interessante. A utilização de um modelo 1D na bacia hidrográfica simplifica o processo de configuração, exigindo menos dados e permitindo estimar parâmetros com maior facilidade, capturando a dinâmica principal do fluxo na bacia, enquanto o modelo 2DH se concentra na representação detalhada do corpo d'água, onde os processos hidrodinâmicos são mais complexos e a necessidade de informações detalhadas é maior. (Jutel dos Santos, 2024; Chargel, 2018; Ferreira, 2017; Fleischmann, Paiva e Collischonn, 2017; Muhlenhoff, 2016; Liang, Falconer e Lin, 2007).

Esse tipo de acoplamento tem sido aplicado na modelagem hidrodinâmica de sistemas hídricos como rios e suas áreas de inundação, sistemas rio-estuário, rio-lago e rio-reservatório. Estudos têm aplicado o acoplamento de modelos 1D em rios e multidimensionais nos corpos receptores, que trocam informações a cada passo de tempo da simulação, caracterizando uma integração dinâmica.

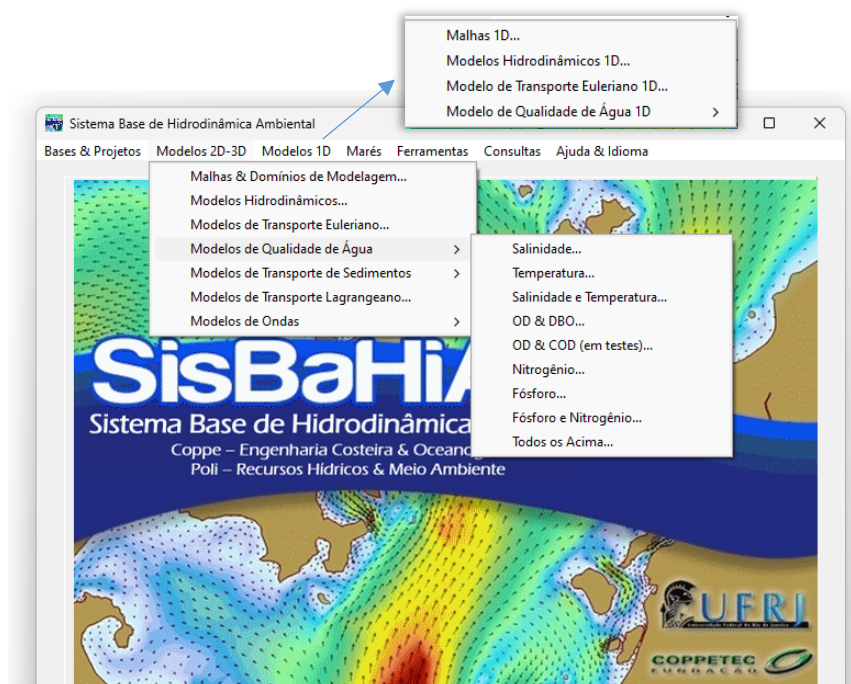
No entanto, tradicionalmente, a modelagem de qualidade de água nessas áreas tem adotado abordagens não integradas, com modelos fluviais e estuarinos operando de forma separada. Esta fragmentação compromete a representação dos processos e limita o uso da modelagem como ferramenta de suporte à decisão.

Neste contexto, este trabalho apresenta o desenvolvimento e a aplicação de uma metodologia de acoplamento dinâmico entre modelos de rios 1D e corpos receptores 2DH, permitindo a troca de informações a cada passo de tempo de simulação. A metodologia foi aplicada à Baía de Guanabara, no Rio de Janeiro, como estudo de caso.

METODOLOGIA

O acoplamento dinâmico foi implementado no SisBaHiA – Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental (Figura 1). Para informações sobre o sistema, pode-se acessar o site www.sisbahia.coppe.ufrj.br, onde encontra-se disponível a Referência Técnica, Rosman (2024). O sistema possui módulos de modelagem digital do terreno, modelagem hidrodinâmica 3D, 2DH e 1D, transporte de sedimentos, geração e propagação de ondas, transporte Lagrangeano, transporte Euleriano e diferentes níveis de complexidade de modelos de qualidade de água 2DH.

Figura 1. Tela do SisBaHiA, mostrando menus de modelos 3D, 2DH e 1D disponíveis.



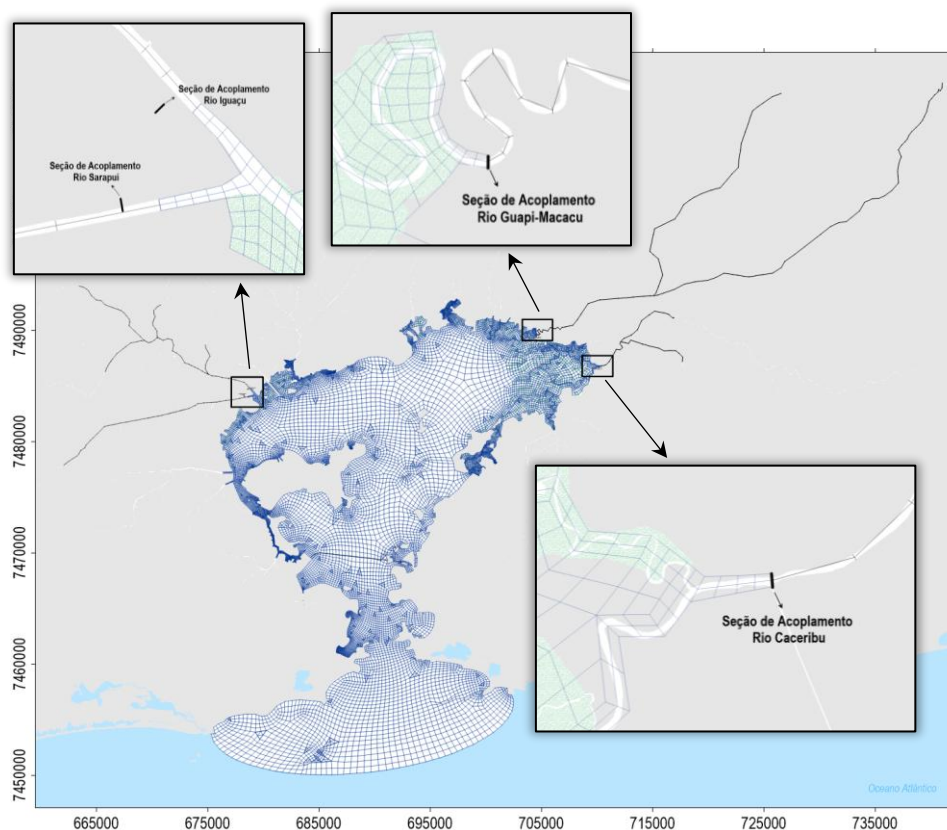
Para realização do estudo utilizou-se os módulos hidrodinâmicos 2DH e 1D, e o módulo de qualidade de água 2DH. Os modelos 1D foram formulados com equações de transporte advectivo-difusivo com reações cinéticas, considerando constituintes como DBO, OD, compostos de nitrogênio e de fósforo e clorofila. O acoplamento discutido é 2DH+1D, sendo a comunicação entre os modelos se dá de forma bidirecional, com trocas de vazões e níveis entre os modelos hidrodinâmicos e de concentrações de constituintes entre os modelos de qualidade de água.

Foram realizados testes de validação dos modelos 1D implementados, comparando com soluções analíticas e com os resultados dos modelos 2DH, que podem ser consultados em Andrade (2024).

- *Aplicação no Sistema Estuarino da Baía de Guanabara*

Realizou-se a aplicação da metodologia de acoplamento 2DH e 1D em um caso real, na Baía de Guanabara, considerando as bacias hidrográficas dos rios Sarapuí, Iguaçu, Guapi-Macacu e Caceribu. A Figura 2 mostra a malha 2DH da Baía de Guanabara e as malhas 1D das bacias consideradas, com destaque mostrando o acoplamento entre os modelos.

Figura 2. Domínio de modelagem, com destaque nas seções de acoplamento entre o modelo 2DH e os modelos 1D. Os resultados de séries temporais foram obtidos nas seções de acoplamento indicadas.



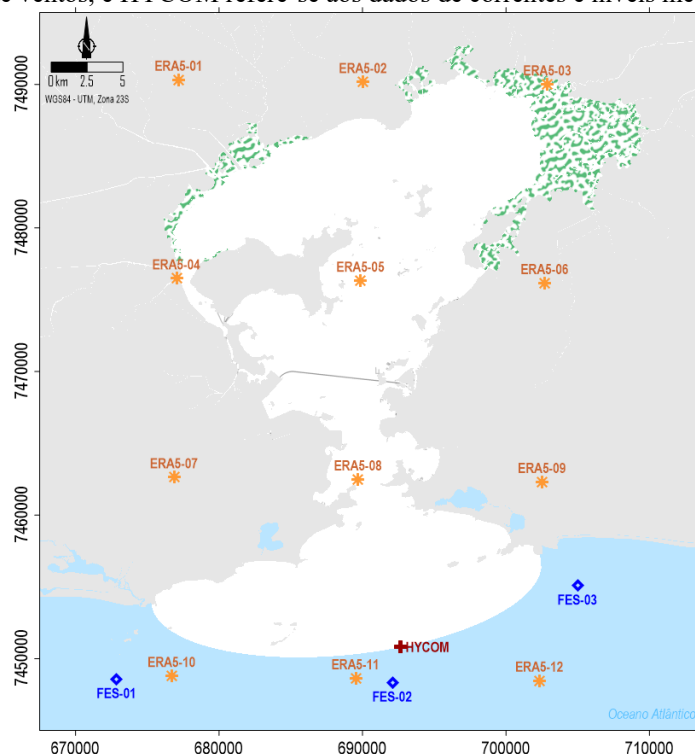
Considera-se nesta aplicação, dois cenários hidrodinâmicos, ambos utilizando a mesma malha. O primeiro, denominado 2DH, é bidimensional e segue a metodologia presente no SisBaHiA para estimar o fluxo virtual de maré na fronteira terrestre dos rios, conforme descrito por Rosman (2024) na Referência Técnica do SisBaHiA. O segundo, chamado 2DH+1D, incorpora o acoplamento entre modelos 2DH e 1D.

Nas análises foram rodados modelos hidrodinâmicos e de qualidade de água. Os modelos consideram os mesmos dados ambientais, incluindo maré astronômica, mare meteorológica,

correntes, ventos e vazões fluviais e lançamentos de esgoto. As simulações foram realizadas para um período de 15 dias, de 01/04/2022 a 15/04/2022, que caracteriza um período de meia estação.

A Figura 3 apresenta as estações de obtenção de dados utilizadas nas modelagens. A série de maré astronômica foi gerada com as Constantes Harmônicas do modelo FES2014- *Finite Element Solution*, que fornece dados baseados no método de Elementos Finitos. Por sua vez, a série de maré meteorológica foi obtida a partir do modelo de reanálise HYCOM - *Hybrid Coordinate Ocean Model*. A correntes costeiras foram representadas por séries temporais de componentes de velocidade U e V, extraídas do modelo HYCOM. Os dados de ventos adotados no modelo 2DH consistem em séries temporais de intensidade e direção, obtidas a partir do modelo de reanálise ERA5 do ECMWF – *European Community Medium scale Weather Forecast*. As vazões fluviais foram calculadas por meio de regionalização de vazões do Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado do Rio de Janeiro – PERHI-RJ (PERHI-RJ, 2014) e (LABH2O, 2016), através de correlação de áreas de drenagem. Para as bacias dos rios Surui, Iriri, Roncador, Guapi-Macacu, Guaraí, Rio Caceribu e Canal de Magé calculou-se a vazão média mensal, através de equações de regionalização de vazões. Utilizou-se os dados dos postos fluviométricos consistidos e gerados pelo PERH-RJ (2014).

Figura 3. Estações de origem dos dados ambientais utilizados nos modelos hidrodinâmicos. Estações com prefixo FES correspondem a dados de constantes harmônicas para geração de marés astronômicas. Estações com prefixo ERA são de dados de ventos, e HYCOM refere-se aos dados de correntes e níveis meteorológicos.



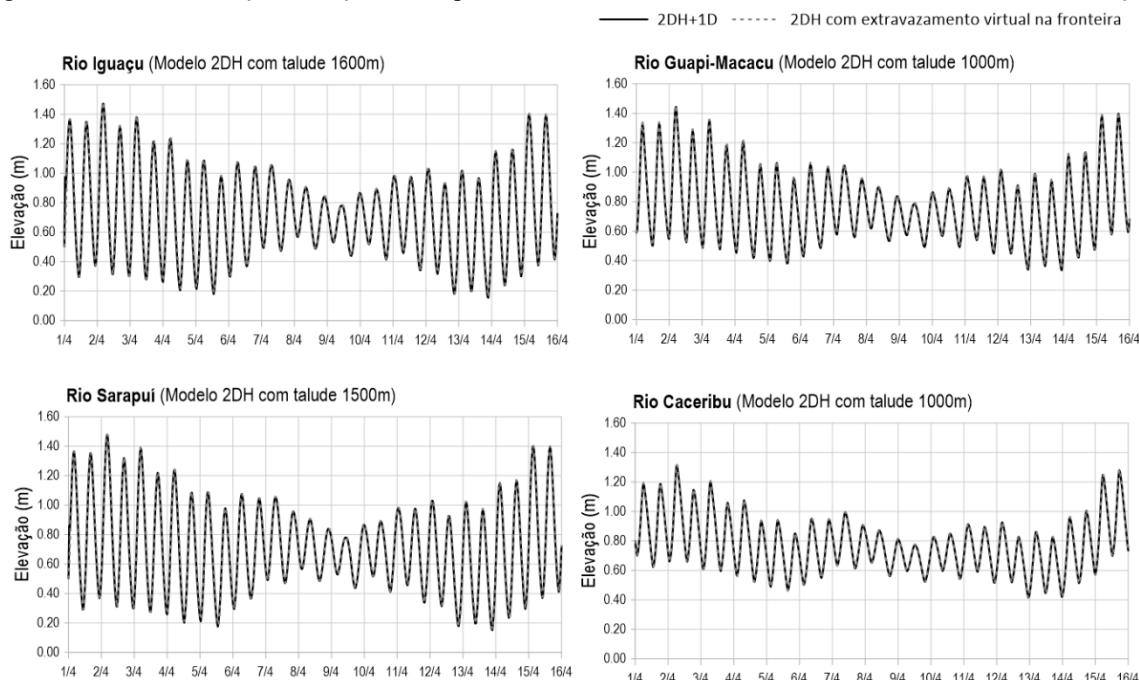
RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para cada parâmetro analisado, apresentam-se séries temporais de 15 dias de carga nas seções de acoplamento das quatro bacias consideradas na modelagem unidimensional. Esse período inclui fases de sizígia e quadratura, permitindo a avaliação da influência das marés no transporte de substâncias nos estuários.

Os níveis dos modelos hidrodinâmicos foram calibrados considerando dados de séries geradas por constantes harmônicas da DHN na Ilha Fiscal. Ambos os modelos reproduziram de forma satisfatória os níveis esperados na Ilha Fiscal. As análises localizadas nos trechos estuarinos

destacados no presente trabalho foram de caráter comparativo das séries temporais dos dois modelos. A Figura 4 seguir apresenta resultados de series temporais de elevação e vazão nas seções de acoplamento mostradas na Figura 2. Ambos os resultados dos modelos hidrodinâmicos reproduziram as variações de maré na seção estuarina, representando bem padrões de sizígia e quadratura. Isso mostra que ambas as abordagens aplicadas, 2DH e 2DH+1D tem boa representação das variações de nível d'água.

Figura 4. Séries de elevação na seção de acoplamento dos modelos 2DH e 2DH+1D, nos 15 dias de simulação.

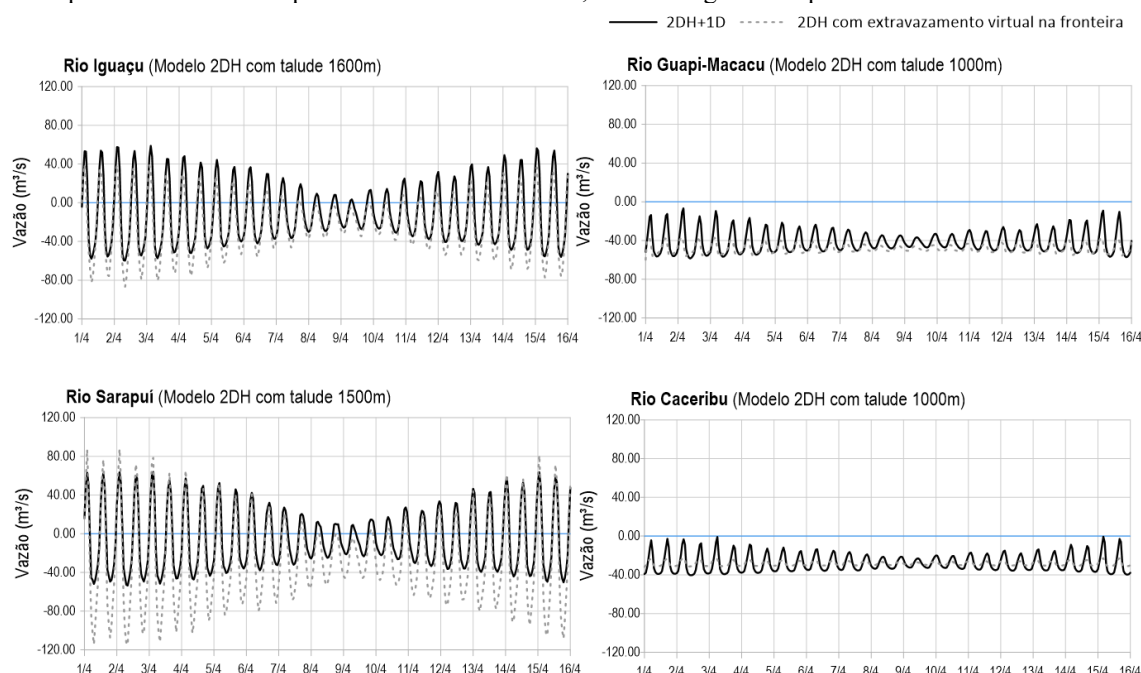


Conforme mostra a Figura 5, ambos os modelos captaram que há inversão de correntes na seção de acoplamento dos rios Sarapuí e Iguaçu e não há essa inversão nos rios Guapi-Macacu e Caceribu. A inversão de correntes é observada por meio das séries de vazão, sendo valores positivos como fluxo de entrada e valores negativos como fluxo da saída.

Considerando a localização das seções de acoplamento e o conhecimento prévio sobre as bacias representadas, os resultados mostram-se coerentes. Nos rios Sarapuí e Iguaçu, os limites do domínio 2DH estão situados aproximadamente a 1.660 metros do espelho d'água da foz de ambos na Baía. Já nos rios Macacu e Caceribu, a seção de acoplamento foi posicionada após a extensão dos manguezais, a uma distância superior a 5.000 metros da foz. Adicionalmente, os resultados obtidos convergem para valores semelhantes aos limites de inversão de correntes identificados no estudo de intrusão salina nos rios Iguaçu, Sarapuí, Guapi-Macacu e Caceribu, descrito no Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado do Rio de Janeiro (Rio de Janeiro, 2013).

Ressalta-se, entretanto, que os resultados de vazão apresentaram diferenças relevantes de magnitude entre os modelos 2DH e 2DH+1D, conforme ilustrado na Figura 5. A complexidade hidrodinâmica dessa interface, combinada à ausência de dados primários para calibração refinada, contribui para as divergências nos valores simulados. Vale destacar que o acoplamento entre os modelos 2DH e 1D é justamente apresentado aqui como estratégia para aprimorar a representação dos fluxos e permitir maior aderência à dinâmica real do sistema.

Figura 5. Séries de vazões na seção de acoplamento dos modelos 2DH e 2DH+1D, nos 15 dias de simulação. Valores positivos de vazão representam fluxo de entrada, valores negativos representam fluxo da saída.



Da Figura 6 até a Figura 8 compara-se os resultados das variáveis de demanda bioquímica de oxigênio, DBO, oxigênio dissolvido, OD, nitrogênio total, NT, e fósforo total, PT. cenário 2DH+1D evidenciou variações diárias de carga associadas às flutuações de fluxo estuarino induzidas pela maré. As séries temporais destacam efeitos característicos dos períodos de sizígia e quadratura, com amplitudes mais intensas durante as marés de sizígia.

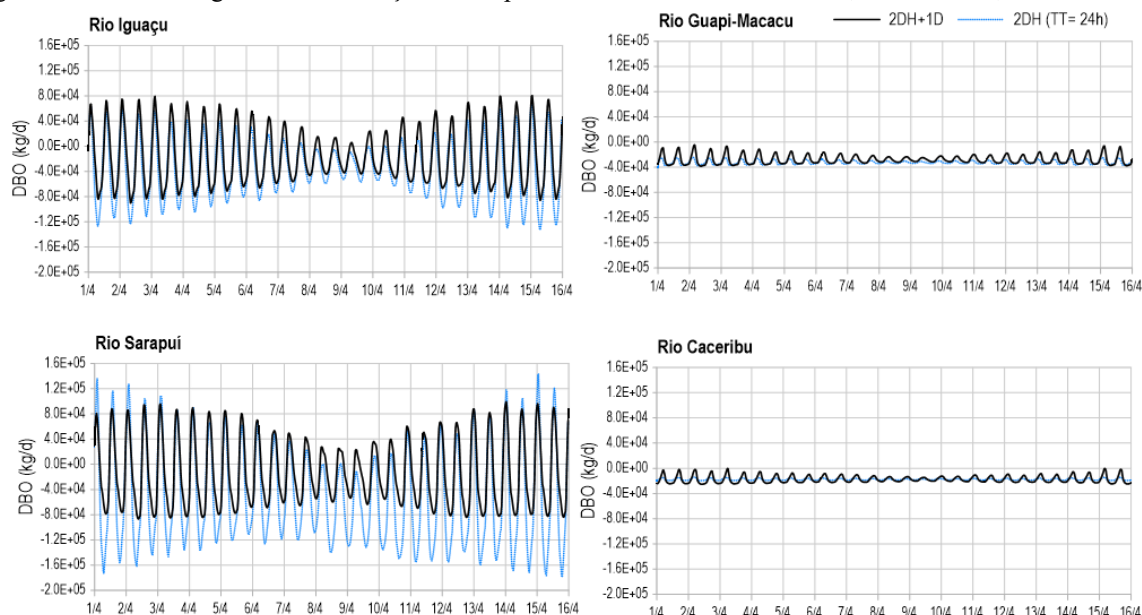
A propagação da maré no domínio unidimensional do modelo acoplado permitiu maior fidelidade na representação dos fluxos e do transporte de substâncias na região estuarina, especialmente nos rios Iguaçu e Sarapuí, onde foram observadas variações expressivas.

Os resultados dos rios Iguaçu e Sarapuí, onde ocorre inversão do sentido das correntes na seção de acoplamento, não apresentam um padrão diretamente relacionado à variação da maré na seção, sendo esse efeito dependente do tempo de transição aplicado no modelo 2DH. Por outro lado, as cargas, calculadas pelo modelo a partir da vazão no MH e da concentração prescrita na fronteira, acompanham a variação do fluxo na seção, refletindo padrões diários da maré e captando também as oscilações dos períodos de sizígia e quadratura.

Cabe ressaltar, contudo, que os valores de carga são fortemente influenciados pela vazão obtida no MH. As diferenças entre os cenários 2DH e 2DH+1D seguem tendências compatíveis com as variações nas séries de vazão. Assim, a representação precisa da vazão no modelo hidrodinâmico é crucial, pois sua inadequação pode comprometer diretamente a estimativa das cargas no modelo de qualidade da água (MQA).

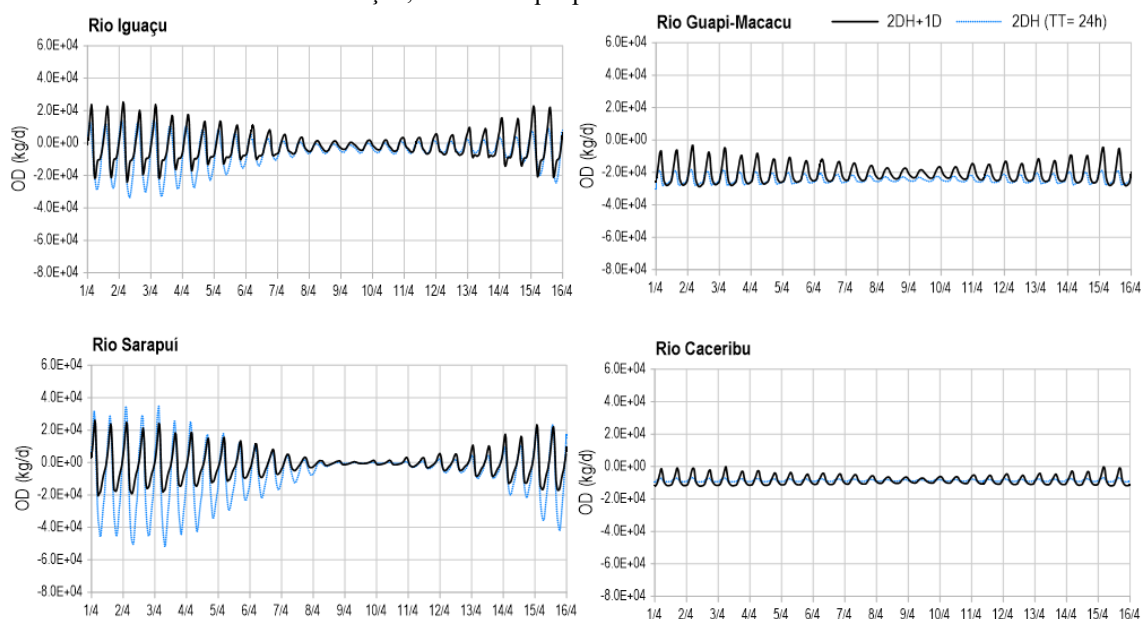
Os resultados de DBO, Figura 6, apontam para uma subestimação da carga no fluxo de entrada durante a maré enchente no estuário nos cenários 2DH em relação ao cenário acoplado 2DH+1D. Por outro lado, observa-se uma superestimação no fluxo de saída durante a maré vazante. Esse comportamento é evidente nas seções de acoplamento dos rios Iguaçu e Sarapuí, onde ocorre inversão do sentido das correntes.

Figura 6. Séries de carga de DBO na seção de acoplamento dos modelos 2DH+1D, 2DH - τ 24h, durante 15 dias.



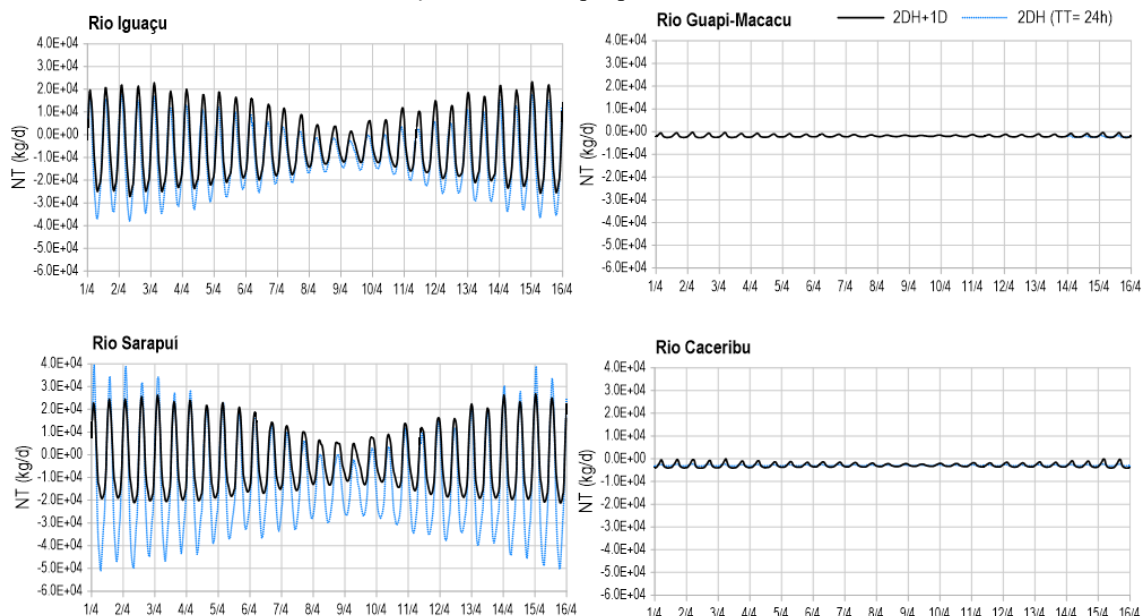
Comparando os resultados de oxigênio dissolvido (OD) entre os modelos 2DH e 2DH+1D, conforme ilustrado na Figura 7, observa-se uma superestimação da carga nos fluxos simulados para o rio Sarapuí durante o período de maré de sizígia. Esse comportamento pode estar associado à limitação do modelo 2DH em representar adequadamente as oscilações hidrodinâmicas nesse regime de maré, resultando em maior concentração de OD estimada em momentos de maior fluxo entrante.

Figura 7. Séries de carga de OD na seção de acoplamento dos modelos 2DH+1D e 2DH - τ 24h, durante 15 dias de simulação, com destaque para os dois últimos dias.



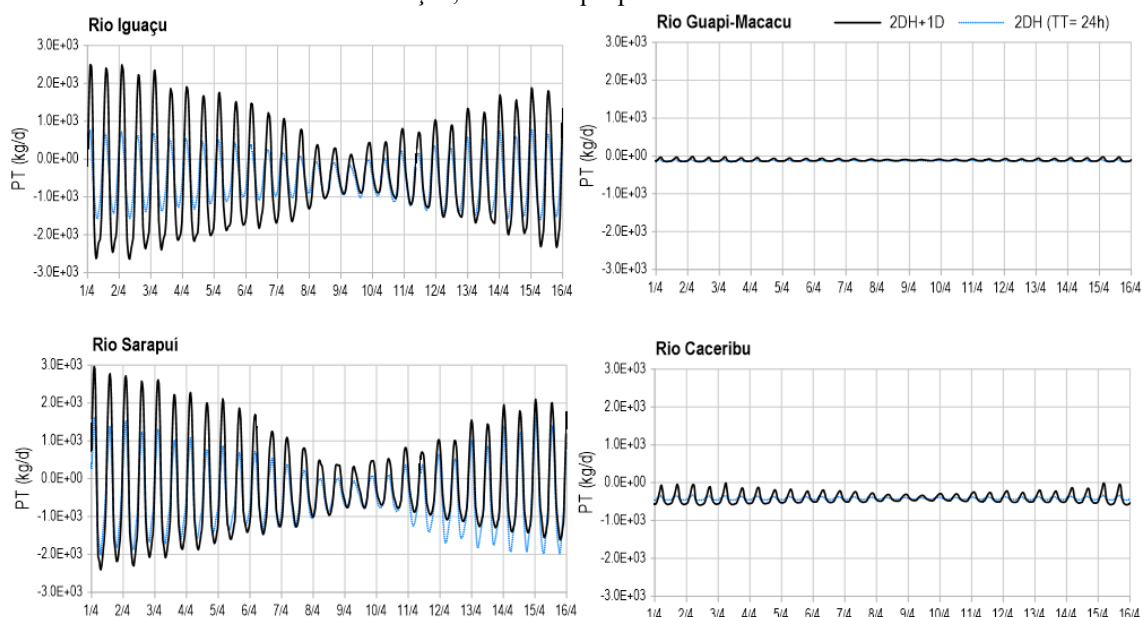
Nos resultados de NT, apresentados na Figura 8, o cenário 2DH - τ 24h indicou maiores cargas durante o fluxo de vazante nos rios Iguaçu e Sarapuí, quando comparado ao cenário acoplado 2DH+1D, e menores durante os fluxos de enchente.

Figura 8. Séries de carga de Nitrogênio Total na seção de acoplamento dos modelos 2DH+1D e 2DH - τ 24h, durante 15 dias de simulação, com destaque para os dois últimos dias.



Nos resultados de fósforo total (PT), Figura 9, observa-se que durante a maior parte dos 15 dias analisados, o cenário 2DH apresentou cargas inferiores em relação ao modelo acoplado 2DH+1D. Isso indica que, além de representar melhor as dinâmicas de fluxo, o modelo 2DH+1D proporciona maior aderência às variações de transporte de nutrientes, com implicações diretas na avaliação das condições tróficas e potenciais processos de eutrofização

Figura 9. Séries de carga de Fósforo Total na seção de acoplamento dos modelos 2DH+1D e 2DH - τ 24h, durante 15 dias de simulação, com destaque para os dois últimos dias.



A comparação dos cenários evidencia a complexidade envolvida na avaliação da qualidade da água em regiões estuarinas, altamente influenciada pela hidrodinâmica, pelo transporte de substâncias e pelas reações cinéticas de produção e consumo, além de diversos fatores ambientais.

A aplicação do acoplamento de modelos de qualidade de água 2DH+1D permite estender o domínio de modelagem para além da zona de inversão de correntes, viabilizando o posicionando adequado das fontes de lançamento nos rios e detalhando as fontes distribuídas na bacia, o que reduz significativamente o volume de inferências na seção de fronteira do modelo.

Os resultados apresentados focam na análise do efeito local do acoplamento 2DH+1D, destacando as vantagens do acoplamento dinâmico implementado no sistema. No entanto, para alcançar uma análise quantitativa mais precisa dos processos hidrodinâmicos e da qualidade da água em qualquer corpo hídrico, é imprescindível realizar calibração e validação com dados primários. Usando a Baía de Guanabara como referência, tal calibração demandaria levantamentos que incluam batimetria detalhada de seções transversais com nível referenciado a um Datum oficial, monitoramento contínuo de vazões e medições de parâmetros de qualidade da água, tanto nos rios afluentes quanto no espelho d'água da Baía. Essas ações são essenciais para elevar a confiabilidade dos modelos e ampliar sua capacidade de prognóstico.

CONCLUSÕES

Apesar das diversas ferramentas disponíveis para apoiar a gestão de recursos hídricos e saneamento, ainda existem desafios significativos na modelagem de corpos d'água complexos, como baías, estuários e lagoas, e suas bacias hidrográficas afluentes. Em especial nas regiões costeiras, a variabilidade hidrológica, meteorológica e oceanográfica intensifica a complexidade dos processos hidrodinâmicos e de qualidade da água.

A metodologia de acoplamento dinâmico desenvolvida e aplicada neste trabalho representa um avanço significativo na modelagem integrada de recursos hídricos, sobretudo em sistemas costeiros. Ao possibilitar a simulação interativa e simultânea de processos em bacias hidrográficas e corpos receptores, a abordagem oferece um suporte técnico robusto para o planejamento e a gestão ambiental.

Ao combinar as vantagens dos modelos 1D e 2DH, a metodologia demonstrou ser uma ferramenta eficaz para subsidiar análises de monitoramento, planejamento e tomada de decisão. Ademais, sua flexibilidade permite aplicação em diferentes configurações de sistemas hídricos com distintas escalas e características geomorfológicas, como rio-estuário, rio-lago e rio-reservatório.

Importa destacar que este trabalho constitui uma etapa inicial da pesquisa, com foco na apresentação e avaliação da metodologia desenvolvida. Etapas subsequentes visam sua aplicação em diferentes sistemas hídricos e aprimoramento por meio da calibração e validação com base em dados primários, conforme a disponibilidade e especificidade de cada caso.

Para alcançar uma análise quantitativa mais precisa dos processos hidrodinâmicos e da qualidade da água, é imprescindível realizar levantamentos que incluam batimetria detalhada de seções transversais referenciadas a um Datum oficial, monitoramento contínuo de vazões e medições de parâmetros de qualidade da água, tanto nos rios afluentes quanto nos corpos receptores. Essas ações são fundamentais para ampliar a confiabilidade dos modelos e fortalecer sua capacidade preditiva em estudos de prognóstico ambiental.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, Verônica Silveira de. *Modelagem de Circulação e Qualidade de Água com Acoplamento Dinâmico de Rios Afluentes com Corpos Receptores*. 2024. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil), Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.
- CHARGEL, Leonardo Tristão. *Avaliação do uso de modelos hidrodinâmicos, suas limitações, efeitos de escala e da representação topográfica*. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/13290/1/886929.pdf> Acesso em: 21 de out. 2023.
- FERREIRA, Cátia Vanessa. *Sistema de Drenagem Público: Construção de um Modelo para São Pedro de Gala*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Especialização em Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, 2017.
- FLEISCHMANN, A.; PAIVA, R.; COLLISCHONN, W. *Modelos hidrológicos-hidráulicos de grandes bacias: comparação entre modelos 1D e 2D na bacia do Rio Negro, Amazônia*. XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Florianópolis, SC, 2017.
- JUTEL DOS SANTOS, V. *Abordagem baseada em volumes para análise de alagamentos e inundações em bacia hidrográfica urbana*. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais), Centro de Ciências Agroveterinárias., Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, SC, 2024. Disponível em: https://www.udesc.br/arquivos/cav/id_cpmenu/3620/Disserta__o_Vanessa_Jutel__parte_1_17188083705165_3620.pdf
- LABH2O. Laboratório De Hidrologia. *Estudos Hidrológicos da Bacia Contribuinte à Baía de Guanabara*. Programa de Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2016.
- LIANG, Dongfang; FALCONER, Roger A.; LIN, Binliang. Linking one- And two-dimensional models for free surface flows. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water Management*, v. 160, n. 3, p. 145–151, 2007. DOI: 10.1680/wama.2007.160.3.145.
- MUHLENHOFF, A. P. *Análise comparativa de esquemas de discretização 1D e 1D/2D para avaliação de curvas de inundação em rio com escassez de dados*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental), Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016. <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/46176>
- PERHI-RJ. *Estudos Hidrológicos e Vazões Extremas*. Rio de Janeiro, 2014.
- RIO DE JANEIRO (Estado). Instituto Estadual do Ambiente – INEA. *Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado do Rio de Janeiro: R3-B – Temas Técnicos Estratégicos, RT-07 – Estudos de Avaliação da Intrusão Salina. Revisão 01*. Rio de Janeiro: INEA, Fundação COPPETEC, fevereiro de 2013. 75 p.
- ROSMAN, Paulo Cesar Colonna. *Referência Técnica do SisBaHiA*. Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: www.sisbahia.coppe.ufrj.br. Acesso em: 1 abr. 2024.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela bolsa de estudos, que permitiu o desenvolvimento do presente trabalho.