

Análise de Movimento de Massas de Água via Traçadores Lagrangeanos no Sistema Lagunar Piratininga-Itaipu, Niterói - RJ.

Roberta Caldas Salcedo Reis¹, Daniel Maia Ramos² & Rodrigo Amado Garcia Silva³

Resumo: O sistema lagunar Piratininga-Itaipu, localizado no município de Niterói (RJ), é caracterizado por duas lagunas costeiras interligadas por canais e conectadas ao oceano adjacente. Esse sistema apresenta elevada complexidade hidrodinâmica, influenciada por forçantes como maré, aportes continentais e pela configuração geomorfológica das conexões hidráulicas. Este estudo investigou os padrões de circulação no sistema lagunar Piratininga-Itaipu por meio da aplicação integrada de modelos hidrodinâmico e lagrangeano, com ênfase na análise da movimentação de traçadores. Foram realizadas simulações lagrangeanas com lançamento de traçadores em regiões estratégicas do sistema lagunar e análises de lançamento de forma contínua nos afluentes, visando identificar padrões de transporte e dispersão de partículas não evidenciados em análises puramente hidrodinâmicas. Os resultados indicaram uma preferência de fluxo no sentido Piratininga, Itaipu e oceano, além de evidenciar diferenças marcantes na conexão entre os compartimentos do sistema. Observou-se maior dispersão e mistura na Laguna de Itaipu, enquanto a Laguna de Piratininga apresentou maior retenção e circulação mais restrita. Os diferentes cenários simulados também demonstraram a influência direta das conexões hidráulicas na redistribuição dos traçadores, ressaltando o papel dos canais na organização dos padrões de circulação.

Palavras-Chave: Sistema lagunar Piratininga-Itaipu; modelagem Lagrangeana; Lagoas costeiras.

Abstract: The Piratininga-Itaipu lagoon system, located in Niterói (RJ), Brazil, consists of two interconnected coastal lagoons linked by channels and connected to the adjacent ocean. This system presents complex hydrodynamic behavior driven by tidal forcing, freshwater inflows, and the geomorphological configuration of its hydraulic connections. This study investigated circulation patterns in the Piratininga-Itaipu lagoon system through the integrated application of hydrodynamic and Lagrangian models, with emphasis on tracer movement analysis. Lagrangian simulations were performed by releasing tracers in strategic regions of the lagoon system, as well as through continuous inputs from tributaries, aiming to identify transport and particles dispersion pathways not captured by purely hydrodynamic analyses. The results revealed a preferential flow from Piratininga toward Itaipu and the adjacent ocean, highlighting significant differences in connectivity between system compartments. Greater dispersion and mixing were observed in Itaipu Lagoon, whereas Piratininga Lagoon exhibited higher tracer retention and more restricted circulation. The different simulated scenarios also demonstrated the direct influence of hydraulic connections on tracer redistribution, emphasizing the role of channels in structuring circulation patterns within the system.

Keywords: Piratininga-Itaipu lagoon system; Lagrangian modeling; Coastal lagoons.

INTRODUÇÃO

O município de Niterói, localizado na porção leste da Baía de Guanabara (RJ), abriga um importante sistema lagunar costeiro associado à sua região oceânica, caracterizado pela presença de praias arenosas e corpos lagunares interconectados. O Sistema Lagunar Piratininga-Itaipu (SLPI) é

1) Mestre e Doutoranda no Programa de Pós-graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra (PPGDOT-UFF) e Pesquisadora do Grupo de Pesquisa em Hidrodinâmica, Hidráulica e Oceanografia (H2O/LABCOAST). E-mail: robertareis@id.uff.br.

2) Graduando em Engenharia de Recursos Hídricos e do Meio Ambiente pela Universidade Federal Fluminense e pesquisador do Grupo de Pesquisa em Hidrodinâmica, Hidráulica e Oceanografia (H2O/LABCOAST). E-mail: daniel_maia@id.uff.br.

3) Professor Adjunto, Departamento de Engenharia Agrícola e Meio-Ambiente, Universidade Federal Fluminense, R. Passos da Pátria 156 sala 235 Bloco D, São Domingos, PPGDOT-UFF, H2O/LABCOAST, Niterói – RJ, rodrigo_amado@id.uff.br.

composto por duas lagunas costeiras, Piratininga e Itaipu, conectadas entre si pelo Canal de Camboatá e ao oceano adjacente por diferentes estruturas hidráulicas, configurando um ambiente de elevada complexidade hidrodinâmica. Esse sistema apresenta dinâmica fortemente controlada por forçantes como maré, aportes fluviais e pela geometria de suas conexões, sendo altamente sensível a alterações em suas condições de contorno. Enquanto Itaipu possui o Canal de Itaipu, um canal de maré sujeito a processos contínuos de assoreamento em sua embocadura, mesmo com a presença de estruturas do tipo guia-corrente, a Laguna de Piratininga conecta-se ao oceano através do Túnel do Tibau, escavado em costão rochoso, cuja eficiência hidráulica tem sido comprometida por recorrentes desmoronamentos de rochas, resultando em obstruções parciais do escoamento. As duas lagunas ainda estão interligadas pelo Canal de Camboatá, que apresenta redução de sua seção hidráulica devido ao assoreamento, limitando a troca de água entre os compartimentos lagunares.

Apesar da existência dessas conexões, estudos anteriores (REIS et al., 2023; REIS et al., 2024) indicam que a renovação das massas de água no sistema ocorre de forma pouco eficiente, evidenciando limitações nos processos de circulação e de troca com o oceano. Enquanto a Laguna de Itaipu apresenta renovação associada à sua conexão direta com o mar, a Laguna de Piratininga depende majoritariamente de aportes fluviais, resultando em uma renovação menos eficiente. Além disso, o Canal de Camboatá não tem se mostrado uma via eficaz de conexão hidrodinâmica entre as duas lagunas, restringindo a troca de água entre esses compartimentos.

Nesse contexto, o presente trabalho propõe a integração entre a modelagem hidrodinâmica e a modelagem lagrangeana, com o objetivo de aprofundar a análise dos padrões de circulação hidrodinâmica e troca de massas de água com o mar no SLPI.

MATERIAIS E MÉTODOS

Modelo Computacional Utilizado

Os modelos utilizados para o desenvolvimento deste estudo fazem parte do SisBaHiA (ROSMAN, 2026) e encontram-se disponível em: www.sisbahia.coppe.ufrj.br. A partir dos campos de velocidade obtidos no modelo hidrodinâmico, foram realizadas simulações lagrangeanas com liberação de traçadores em regiões estratégicas das lagunas e em seus principais afluentes, permitindo investigar trajetórias, conexões entre compartimentos e possíveis caminhos de troca entre o sistema lagunar e o oceano. Com base nessas simulações, foram avaliados diferentes cenários associados às principais conexões hidráulicas do SLPI: i) cenário base; ii) Canal de Itaipu dragado; iii) Túnel do Tibau obstruído; iv) Canal de Camboatá Dragado; v) Canais de Itaipu e Camboatá dragados. Desta maneira, avaliaram-se os efeitos da restrição do fluxo no Túnel do Tibau, assim como as condições de assoreamento e dragagem do Canal de Itaipu, principal ligação com o oceano, e do Canal de Camboatá, responsável pela conexão entre as lagunas. O cenário v) considera a otimização de todos os canais, visando compreender o potencial máximo de circulação hidrodinâmica do sistema, com implicações diretas para a melhoria da qualidade da água e a sustentabilidade ambiental das lagunas.

Essa abordagem possibilita responder questões que não são plenamente capturadas pela modelagem euleriana tradicional, como o destino das massas de água que ingressam no sistema, contribuindo para uma compreensão mais abrangente da dinâmica hidráulica do SLPI e fornecendo subsídios técnicos para o planejamento e a gestão ambiental da área.

Dados de Entrada e Configurações do Modelo

Para simular as situações abordadas neste estudo, adotou-se conjunto de dados fornecidos pelo Programa Pró-Sustentável, desenvolvido pela Prefeitura Municipal de Niterói

(<https://www.prosustentavel.niteroi.rj.gov.br/rt-sistema-lagunar/>). Dados de batimetria, vazões fluviais e níveis de água foram utilizados nas simulações, especialmente nos processos de calibração e validação do modelo hidrodinâmico, descritos por Reis et al. (2024). Os resultados obtidos apresentaram Índice de Concordância superior a 0,89, erros médios absolutos inferiores a 0,02 m e coeficientes de correlação entre 0,51 e 0,76 para os níveis d'água observados e simulados. Tais indicadores evidenciam a capacidade do modelo em reproduzir satisfatoriamente a dinâmica hidrodinâmica do sistema, conferindo confiabilidade às análises dos cenários avaliados neste estudo.

Os dados de batimetria utilizados para a região marítima foram obtidos das [Cartas Náuticas](#) da DHN - Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil. Foram utilizados dados das cartas náuticas Baía de Guanabara nº 1501 e Barra do Rio de Janeiro nº 1511, ambas produzidas e atualizadas pela DHN. A Figura 1 traz a caracterização batimétrica e a disposição da malha na região de interesse.

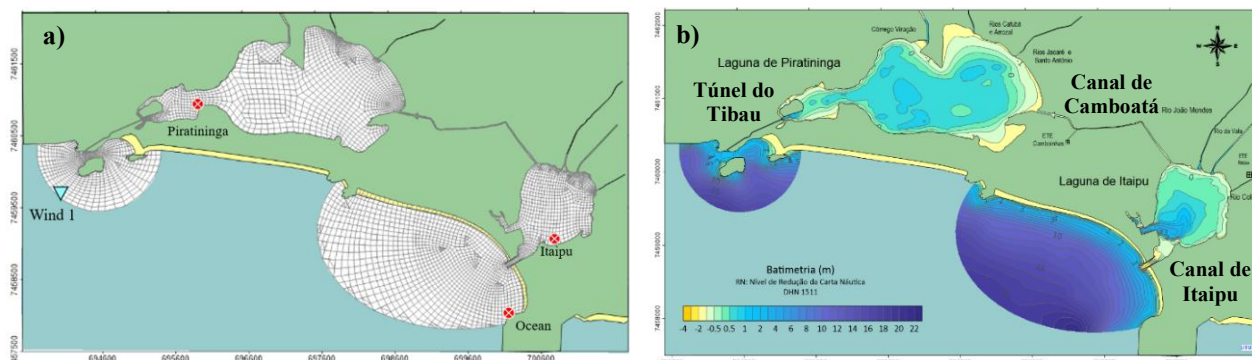


Figura 1 - a) Mapa das lagoas com a malha sobreposta à região do domínio, pontos de obtenção de níveis de água e estação de vento considerada. b) Mapa da região das lagoas de Piratininga e Itaipu, mostrando o domínio da modelagem com batimetria.

A maré utilizada na modelagem compreende um período de 35 dias entre os meses de setembro e outubro de 2018. Para este período, as condições meteoceanográficas observadas mostraram-se usuais, ou seja, sem eventos extraordinários. Os dados utilizados consideram a combinação de maré astronômica e maré meteorológica, utilizando nível de redução da carta náutica da DNH 1511 Barra do Rio de Janeiro. No referencial de nível adotado, o nível médio está na cota 0,7m.

Os ventos utilizados como forçantes do modelo hidrodinâmico foram obtidos da reanálise atmosférica [ERA5](#), produzida pelo Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo (ECMWF). Para o presente trabalho, foi extraída série temporal de velocidade e direção do vento em uma grade próxima à região do SLPI. Esses dados foram aplicados ao modelo para representar as condições de vento locais, influenciando diretamente os processos de circulação e mistura hidrodinâmica no sistema estudado.

As vazões fluviais médias utilizadas no modelo, referentes aos rios afluentes às lagoas, foram obtidos de HYDROSCIENCE (2018). Além das vazões fluviais, foram considerados também os valores médios anuais das estações de tratamento de esgotos, em nível terciário, conforme SILVA et al. (2013).

Para rugosidade equivalente do fundo, foram considerados cenários semelhantes para todo a região do domínio com $\varepsilon = 0,02$ m, típica de areias médias, como usual em fundos de zonas costeiras. Exceção para o Túnel do Tibau e para o enrocamento presente no Canal de Itaipu que receberam $\varepsilon = 0,15$ m, valor típico de sedimentos com obstáculos, como pedras e troncos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas marés de quadratura, a altura de maré na Laguna de Itaipu é de aproximadamente 0,2 m. Já nas marés de sizígia, a amplitude de maré é de aproximadamente 0,4 m. A Laguna de Itaipu experimenta as maiores variações entre preamar e baixamar devido à influência natural da maré em seu canal, como pode ser visto na Figura 2. Por outro lado, na Laguna de Piratininga, a altura de maré não chega a 0,1 m. Isso ocorre devido a problemas de assoreamento no Canal de Camboatá, que conecta a Laguna de Piratininga à Laguna de Itaipu. Além disso, a presença de uma soleira na embocadura do Túnel do Tibau impede que o nível da Laguna de Piratininga diminua excessivamente.

Os pontos de obtenção das séries temporais foram mostrados na Figura 1.

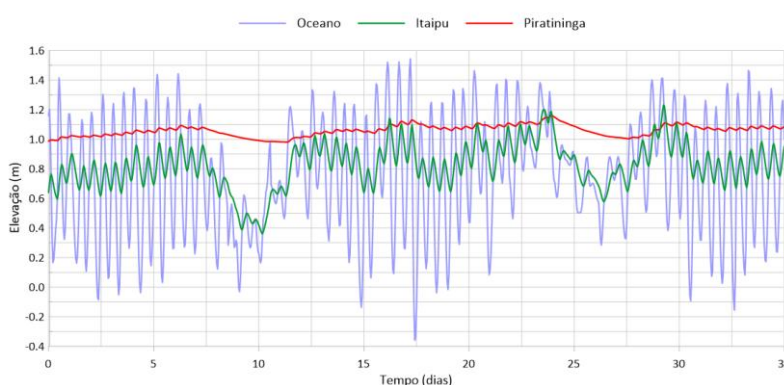


Figura 2 - Série temporal obtida de níveis de água no mar e no centro das lagunas. Os pontos de obtenção das variações são mostrados na Figura 1. Referência de Nível: Nível de Redução da Carta Náutica 1511 DHN.

Em uma primeira análise lagrangeana, os traçadores foram lançados no momento inicial da simulação e em regiões estratégicas do sistema lagunar (Figura 3), de modo a representar diferentes compartimentos hidrodinâmicos. Foram consideradas a porção marítima da Laguna de Piratininga, a porção oeste e a porção leste da mesma laguna, além da Laguna de Itaipu e afluentes localizados à norte das lagunas. Essa configuração inicial permitiu avaliar os padrões de dispersão e conexão entre os diferentes setores do sistema, bem como identificar possíveis assimetrias nos processos de transporte das massas d'água.

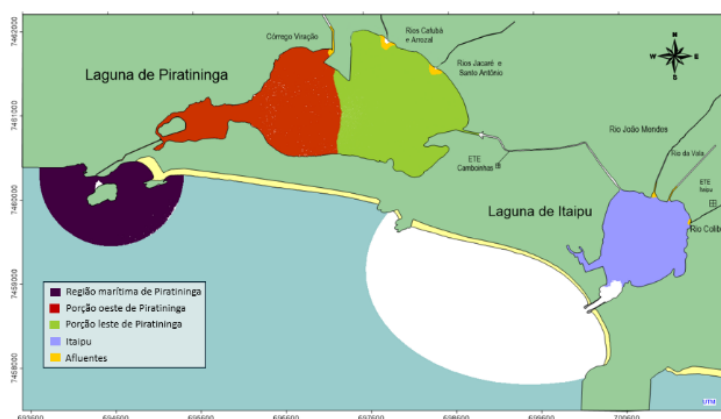


Figura 3 - Condição inicial da análise feita por regiões.

Na Figura 4 e na Figura 5 são apresentados os padrões de dispersão dos traçadores após 15 e 60 dias de simulação, respectivamente, intervalos nos quais foram observadas as respostas mais representativas do sistema. De modo geral, verifica-se que, na ausência do Túnel do Tibau, parte significativa dos traçadores inicialmente lançados na Laguna de Piratininga permanece retida mesmo

após 60 dias. Outro fato importante é que este cenário apresentou a maior permanência de partículas em todo o período simulado. Por outro lado, os cenários que consideram o Canal de Camboatá dragado evidenciam maior eficiência na mistura e dispersão dos traçadores, indicando o papel relevante dessa conexão na circulação interna do sistema.

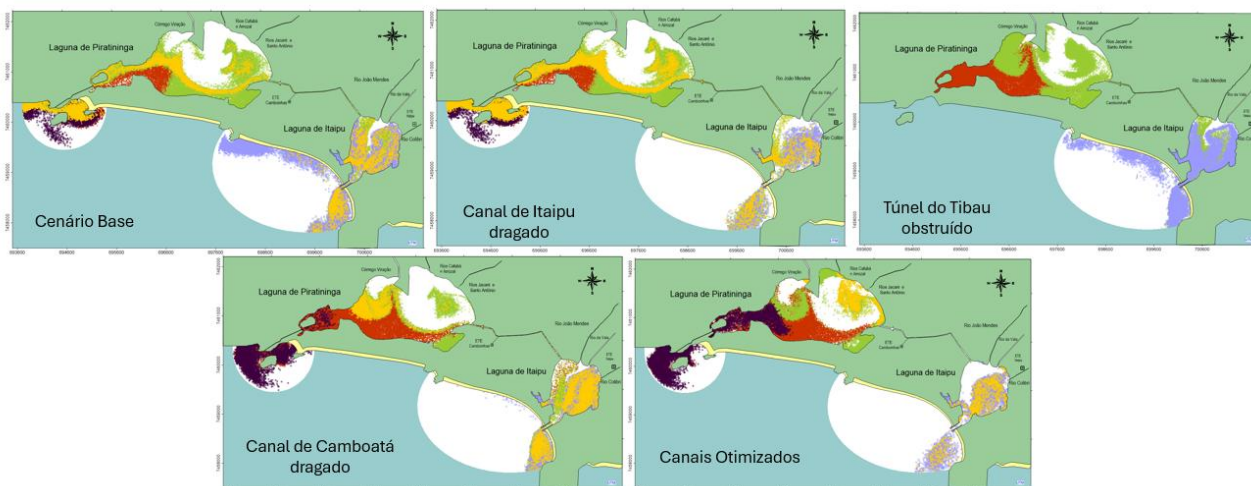


Figura 4 - Análise por região após 15 dias simulados.

Adicionalmente, observa-se que os traçadores inicialmente lançados na Laguna de Itaipu não atingem a Laguna de Piratininga ao longo do período simulado, sugerindo uma satisfatória conexão da laguna ao mar, o que foi acentuada nos cenários que consideram o Canal de Itaipu dragado. Por fim, o cenário com canais otimizados, considerando o Túnel do Tibau aberto e os canais de Itaipu e Camboatá dragados, apresentou os maiores níveis de mistura entre os traçadores. Esse comportamento está associado à ampliação das vias de troca hídrica, uma vez que a laguna passa a contar com 2 entradas e saídas de fluxo, intensificando os processos de circulação das massas d'água.

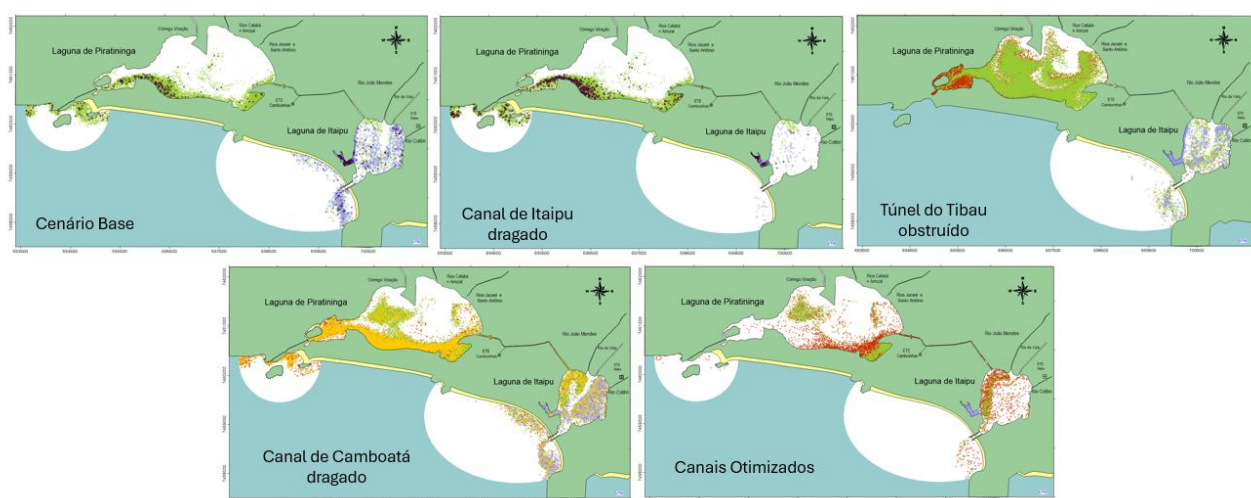


Figura 5 - Análise por região após 60 dias simulados.

A Figura 6 mostra os momentos iniciais da análise realizada para os traçadores lançados de forma contínua nos afluentes durante o período simulado. Nas Figuras 7 e 8, são apresentados os padrões de dispersão dos traçadores após 15 e 60 dias de simulação, respectivamente.

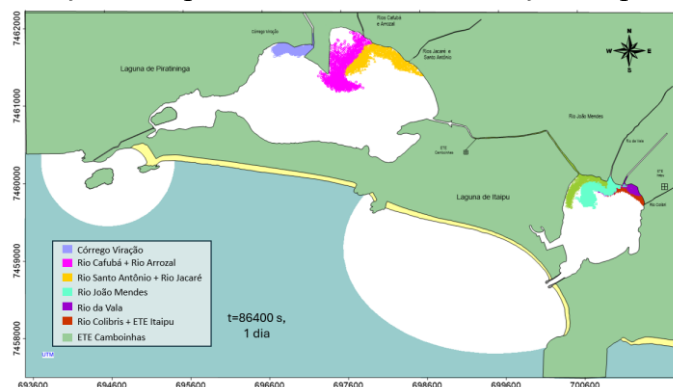


Figura 6 - Condição após 1 dia da análise feita por vazões conhecidas.

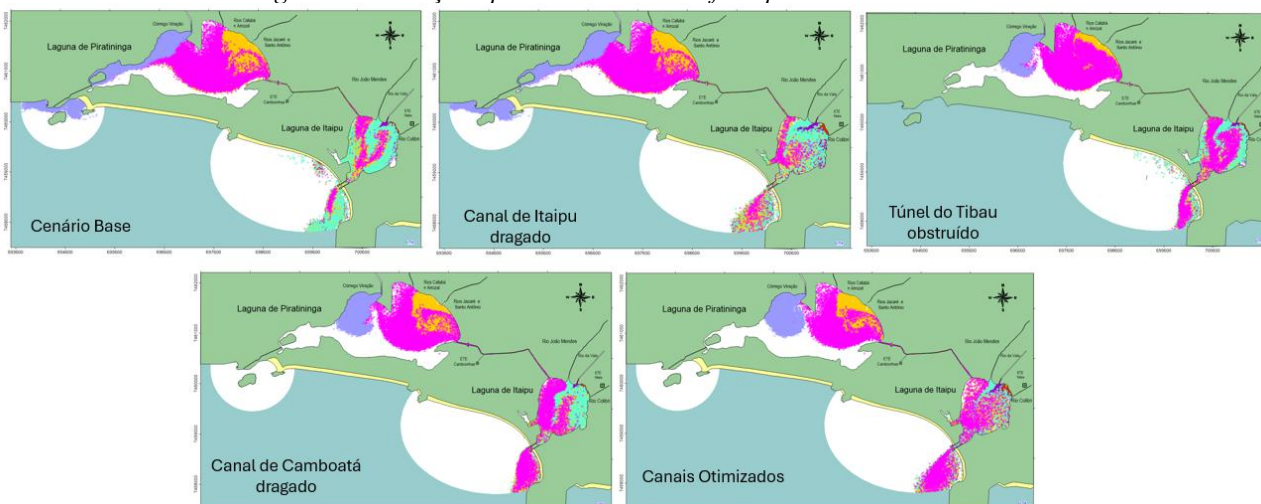


Figura 7 - Análise por vazão conhecida após 15 dias simulados.

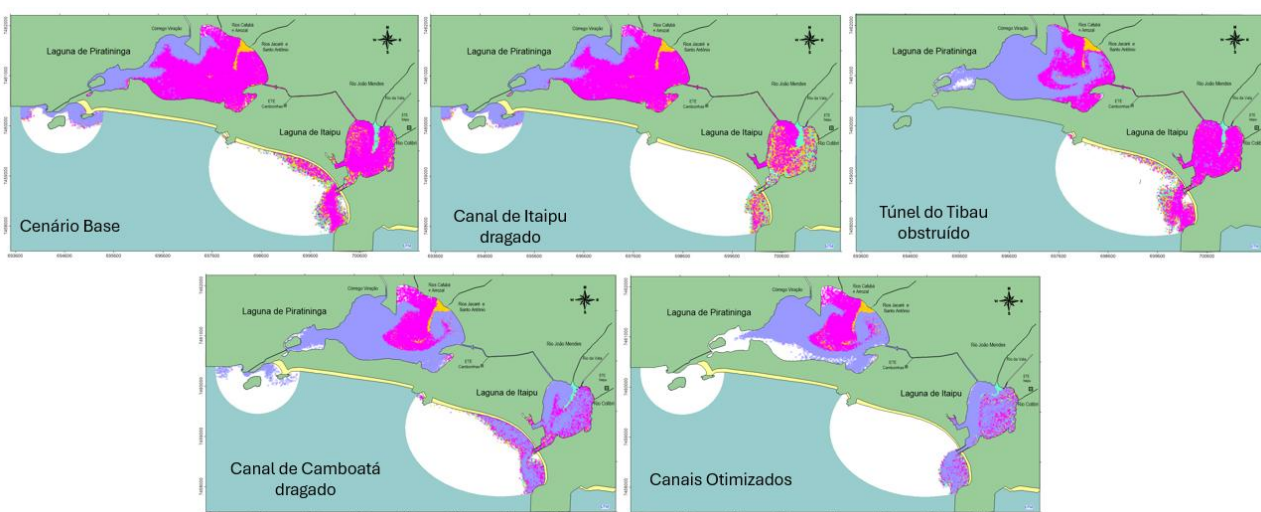


Figura 8 - Análise por vazão conhecida após 60 dias simulados.

Observa-se que a Laguna de Itaipu e sua porção marítima adjacente apresentam traçadores provenientes de todos os afluentes do sistema lagunar, evidenciando maior conexão hidrodinâmica e capacidade de mistura nesse compartimento. Em contraste, a Laguna de Piratininga apresenta predominantemente traçadores oriundos de seus próprios afluentes, indicando uma circulação mais restrita e menor intercâmbio com as demais regiões do sistema. Destaca-se que os traçadores oriundos da ETE Camboinhas somente foram identificados na Laguna de Piratininga nos cenários que consideram a dragagem do Canal de Camboatá, reforçando a importância dessa conexão para o transporte entre os compartimentos.

Adicionalmente, verifica-se que a circulação interna de Piratininga, na ausência do Túnel do Tibau, favorece a retenção dos traçadores provenientes do Córrego Viração, especialmente na porção oeste da laguna. De maneira geral, as águas oriundas dos afluentes de Piratininga tendem a escoar preferencialmente em direção ao Canal de Camboatá e, posteriormente, ao Canal de Itaipu, configurando um fluxo residual orientado nesse sentido. Esse comportamento reforça a existência de uma deriva dominante do escoamento, controlada pelas conexões hidráulicas do sistema e pela sua configuração geomorfológica.

Nesse contexto, observa-se que, no cenário em que todas as conexões hidráulicas se encontram ativas, com destaque para a dragagem do Canal de Camboatá, há um aumento significativo da circulação no sistema, especialmente na porção oeste da Laguna de Piratininga. Nessa condição, verifica-se uma intensificação da entrada de água por esse setor, promovendo uma reorganização dos padrões de escoamento e estabelecendo uma deriva preferencial no sentido oeste-leste (Figura 9), em direção ao Canal de Itaipu e ao oceano adjacente. Esse resultado evidencia o papel fundamental do Canal de Camboatá na redistribuição das massas d'água e na integração hidrodinâmica entre os compartimentos lagunares.



Figura 9 - Quando o Canal de Camboatá é dragado, estabelece-se um fluxo residual, formando uma célula de circulação. A água marinha (setas vermelhas) deriva do Túnel do Tibau em direção ao leste e se mistura com a água proveniente dos rios (setas em azul claro). Essa água misturada (setas em rosa) escoar através do Túnel do Tibau, atravessa a Laguna de Itaipu e deixa o sistema lagunar pelo Canal de Itaipu.

CONCLUSÃO

As análises realizadas, a partir da aplicação integrada dos modelos hidrodinâmico e lagrangeano, permitiram identificar padrões consistentes de circulação, dispersão e conexão no SLPI. De modo geral, os resultados evidenciam uma clara preferência de fluxo no sentido Piratininga, Itaipu e oceano, configurando uma deriva residual que condiciona os processos de transporte das massas d'água, visto que o Canal de Itaipu se mostra a principal forma de conexão do sistema com oceano. Esse comportamento está diretamente associado às características hidráulicas deste e dos demais canais de conexão, destacando o papel fundamental destas estruturas no controle da circulação.

Cabe ressaltar que as simulações foram iniciadas em condição de maré enchente, o que influencia a dinâmica inicial de entrada de água no sistema e, consequentemente, a dispersão dos traçadores. Observou-se ainda que os traçadores lançados no Canal de Camboatá, durante a análise de dispersão contínua, somente atingem a Laguna de Piratininga nos cenários em que foi considerada a sua dragagem. Esse resultado reforça a importância da manutenção e adequação hidráulica deste e dos outros canais para o aumento da conexão com o mar e da capacidade de renovação do sistema, com implicações diretas para a melhoria da qualidade ambiental das lagoas.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio do Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra da Universidade Federal Fluminense e financiado pela FAPERJ - Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro, Processo SEI E-26/200.239/2023.

REFERÊNCIAS

- HYDROSCIENCE. (2018). *"Relatório de Hidrologia, Caracterização das Vazões e dos Aportes de Cargas Contribuintes ao Sistema Perilagunar Piratininga-Itaipu."* Hydroscience, Porto Alegre, RS, Brasil.
- PMN - PREFEITURA MUNICIPAL DE NITERÓI. (2018). "Projeto Conceitual - Parque Orla Piratininga, Volume I e II." Prefeitura Municipal de Niterói, RJ.
- REIS, R. C. S.; ROSA, A. S.; SILVA, R. A. G. (2023). *"Influência do Túnel do Tibau na Renovação de Massas D'Água do Sistema Lagunar Piratininga-Itaipu."* XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.
- REIS, R. C. S.; RAMOS, D. M.; SILVA, R. A. G. (2024). *"Avaliação das Taxas de Renovação das Águas do Sistema Lagunar Piratininga-Itaipu via Modelagem Computacional, Niterói - RJ."* II Simpósio Nacional de Mecânica dos Fluidos e Hidráulica.
- REIS, R. C. S., RAMOS, D. M., SILVA, R. A. G., (2024). *"Calibração e Validação do Modelo Hidrodinâmico do SisBaHiA para o Sistema Lagunar Piratininga-Itaipu, RJ"*. II Simpósio Nacional de Mecânica dos Fluidos e Hidráulica.
- ROSMAN, P. C. C. (2026). *"Referência Técnica do SisBaHiA®."* COPPE/UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Disponível em: http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/SisBAHIA_RefTec_V95.pdf
- SILVA, R. A. G., QUEIROZ, R. S., ROSMAN, P. A., ROSMAN, P. C. C. (2013). *"Relatório Técnico da modelagem Hidrodinâmica Ambiental para Planejamento de Obras nas Lagoas de Piratininga e Itaipu."* Fundação COPPETEC - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.