

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

RENOVAÇÃO DAS ÁGUAS NA LAGOA DE ARARUAMA (RJ): BENEFÍCIOS DA ABERTURA DE CANAL DE MARÉ NA REGIÃO OESTE

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

Abstract: This study evaluates water renewal processes in the Araruama Lagoon (RJ, Brazil) using computational hydrodynamic modeling with an Eulerian approach, focusing on the effectiveness of a proposed new connection to the sea, named the Western Canal. The lagoon is a coastal system of high environmental and economic importance, historically characterized by low water renewal rates and recurring eutrophication events. The methodology involved 92-day simulations under summer conditions, dominated by typical northeast winds, with and without the presence of the auxiliary canal. Additional simulations representing winter conditions, with predominant southwest winds, were conducted to enable a comparative seasonal circulation analysis under unfavorable wind regimes. Renewal rates were analyzed at six points along the lagoon and one in the adjacent marine area. Results from the Base Scenario (current configuration with the Itajuru Canal) revealed low renewal rates, especially in the central and western sectors, with values below 30%. The inclusion of the Western Canal significantly improved the renewal patterns, with the central sector reaching approximately 50% renewal and the western sector showing satisfactory exchange levels, even under unfavorable wind conditions. Water age modeling further highlighted a greater tendency for stagnation in central and marginal areas of the lagoon, particularly in the northern sector. The simulations with the auxiliary canal indicated a significant improvement in these patterns.

Resumo: Este estudo apresenta uma avaliação da renovação das águas na Lagoa de Araruama (RJ), utilizando modelagem computacional hidrodinâmica e euleriana, com foco na análise da eficiência de uma nova ligação com o mar, denominada Canal Oeste. A laguna é um sistema costeiro de elevada importância ambiental e econômica, mas que apresenta histórico de baixa renovação e episódios recorrentes de eutrofização. A metodologia envolveu a realização de simulações de 92 dias, com e sem a presença do canal auxiliar, representando o regime de verão caracterizado por ventos de nordeste, típicos na região. Adicionalmente, foram realizadas simulações representando o regime de inverno, com ventos predominantes de sudoeste, a fim de possibilitar uma análise comparativa entre os diferentes padrões sazonais de circulação com a presença de ventos desfavoráveis. Foram analisados seis pontos ao longo da laguna e um ponto na região marítima, evidenciando, no Cenário Base (Canal de Itajuru), taxas de renovação reduzidas, principalmente nas porções central e oeste da laguna, que apresentaram valores inferiores a 30%. A inclusão do Canal Oeste resultou em melhoria significativa, com a região central atingindo cerca de 50% de renovação e a região oeste sendo satisfatoriamente renovada, mesmo sob condições de vento desfavoráveis. A modelagem de idade da água indicou maior tendência à estagnação nas áreas centrais e marginais da laguna, especialmente na região norte. As simulações com o canal auxiliar indicaram melhora significativa nestes padrões.

Palavras-Chave – Lagoa de Araruama, modelagem hidrodinâmica, renovação de águas.

1) Doutoranda do 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.

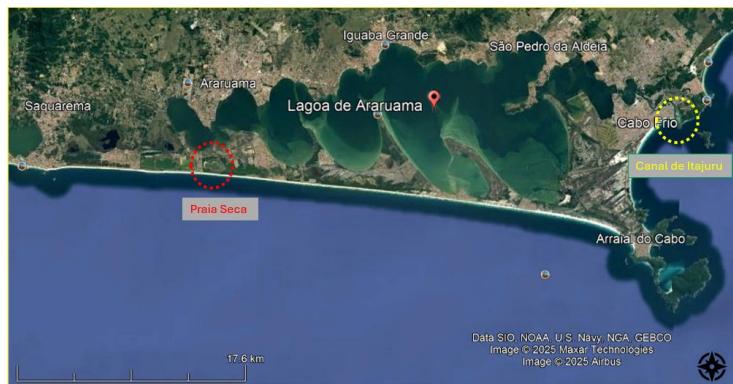
2) Graduando em Engenharia de Recursos Hídricos e do Meio Ambiente pela Universidade Federal Fluminense e pesquisador do Grupo de Pesquisa em Hidrodinâmica, Hidráulica e Oceanografia (H2O/LABCOAST). E-mail: daniel_maia@id.uff.br.

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.

1. INTRODUÇÃO

Localizada na Região dos Lagos, a Lagoa de Araruama (Figura 1) constitui um dos ecossistemas lagunares mais importantes do estado do Rio de Janeiro, destacando-se pela singularidade ecológica e por sua importância social, econômica e cultural. Abrangendo os municípios de Araruama, Arraial do Cabo, Cabo Frio, Iguaba Grande e São Pedro da Aldeia, é considerada a maior laguna hipersalina em ambiente costeiro do mundo, com cerca de 220 km² de superfície e uma profundidade média de 2,5 metros. Sua bacia hidrográfica é caracterizada por clima semiárido, baixa pluviosidade e alta evaporação, Moreira (2001). Possui apenas uma conexão permanente com o mar: o Canal de Itajuru, localizado no município de Cabo Frio, o que condiciona fortemente sua dinâmica hidrosedimentológica, além da qualidade e salinidade de suas águas.

Figura 1- Imagem da Lagoa de Araruama, indicando a localização do Canal Oeste com círculo vermelho e Canal de Itajuru com amarelo. Fonte: Google Earth



Este sistema lagunar é caracterizado por episódios recorrentes de eutrofização, resultantes do aporte excessivo de nutrientes associado à baixa taxa de renovação de suas águas. Uma alternativa para intensificar a circulação hidrodinâmica e, consequentemente, promover uma maior renovação das massas d'água da Lagoa de Araruama, seria a abertura de uma nova conexão com o mar em sua porção oeste, Silva & Rosman (2016). Esta intervenção poderia potencializar a ação da marcante persistência dos ventos de nordeste, que promovem o empilhamento de água na extremidade oeste da laguna, conforme demonstrado por Cunha (2003) e Gava (2008). A implantação desse canal, conjugada ao regime dominante dos ventos, tenderia a estabelecer uma circulação residual efetiva no sentido leste-oeste, favorecendo a exportação do excesso de nutrientes acumulados. A nova ligação com o mar foi referida como Canal Oeste, cuja embocadura está prevista para o trecho costeiro conhecido como Praia Seca.

Este estudo tem como principal objetivo avaliar as taxas de renovação da Lagoa de Araruama considerando diferentes cenários de conectividade com o oceano. Para isso, foram realizadas simulações computacionais contemplando a condição base, com a conexão com o mar adjacente ocorrendo através do Canal de Itajuru, e cenário projetado incorporando a abertura de um segundo canal, o denominado Canal Oeste, na região da Praia Seca.

O período simulado abrange o mês de julho de 2000, período representativo dos dados de batimetria, maré e vento utilizados como condição de contorno pelos modelos utilizados, sendo caracterizado por ventos atípicos para região, com ocorrências predominantes de sudoeste, verificando assim o desempenho do Canal de Oeste em cenário desfavorável.

Além da análise das taxas de renovação, o estudo também avalia a idade da água, com o intuito de identificar áreas susceptíveis à estagnação hídrica e acúmulo de nutrientes, que podem favorecer processos de eutrofização.

SOBRE MODELAGEM COMPUTACIONAL DE CORPOS DE ÁGUA

Para o presente estudo, foram utilizados os Modelos Hidrodinâmico e Euleriano disponíveis no Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental (www.sisbahia.coppe.ufrj.br). Considerando as características hidrodinâmicas do sistema em estudo, a utilização de um modelo de transporte advectivo-difusivo médio na vertical se mostra bastante apropriada para simular a dispersão de substâncias ou escalares passivos bem dissolvidos na coluna d'água. Esses escalares são denominados passivos justamente por não influenciarem a dinâmica hidrodinâmica do meio, permitindo, assim, que o modelo de transporte seja desacoplado do modelo hidrodinâmico.

Grande parte das substâncias presentes na água, cujas concentrações variam ao longo do tempo, são passivas e não conservativas, pois, embora não alterem a hidrodinâmica, podem sofrer modificações em sua concentração em decorrência de processos físicos, químicos e biológicos, De Paula (2009).

No presente estudo, para a avaliação da taxa de renovação das águas, foi considerada uma substância genérica fictícia, tratada como passiva e, diferentemente dos parâmetros usuais de qualidade, conservativa. Assim, essa substância será transportada exclusivamente pelos processos advectivos e difusivos, visto que são os únicos mecanismos envolvidos nas trocas de volumes de água, Aguilera (2020). A seguir, são apresentados os dados ambientais empregados.

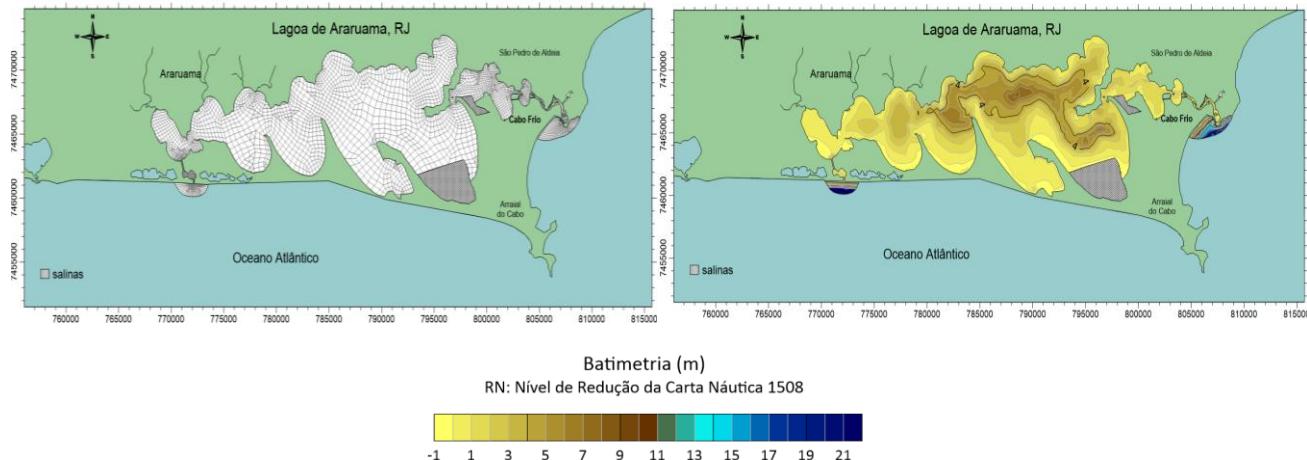
2. METODOLOGIA E DADOS AMBIENTAIS UTILIZADOS

2.1 Modelo Digital do Terreno

A Figura 2 apresenta um mapa do domínio de modelagem para o cenário projetado, com batimetria da região estudada, traçado dos afluentes e a malha de elementos finitos utilizada, composta de 4551 nós de cálculo. O que difere esta malha para a do cenário base é o acréscimo do Canal Oeste, conectando a Lagoa de Araruama ao mar através da enseada da Praia Seca, passando pela Lagoa Pitanguinha e estabelecendo assim uma segunda conexão da Lagoa de Araruama ao mar. A batimetria utilizada é uma compilação de dados medidos em campanhas da Universidade Federal Fluminense (UFF) e da Superintendência Estadual de Rios e Lagoas (SERLA). O estudo realizado por Gava (2008), na Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), sobre as taxas de renovação da Lagoa de Araruama serviu de subsídio para a modelagem desenvolvida neste trabalho. É importante destacar que a seção transversal do canal considerada nesta pesquisa foi otimizada em relação àquela simulada por Gava (2008), visando aprimoramento na renovação.

A Lagoa Pitanguinha é uma pequena laguna situada entre a Lagoa de Araruama e o oceano Atlântico, na região da Praia Seca (Araruama). A escolha dessa rota se deu pois potencialmente proporcionaria os melhores resultados em termos de renovação das águas, uma vez que os ventos predominantes na região, oriundos do quadrante nordeste, induzem uma deriva em direção ao oeste, promovendo o acúmulo de água na área da Enseada de Praia Seca, segundo Silva & Rosman (2016).

Figura 2- Mapa da região das lagunas de Piratininga e Itaipu mostrando acima, o mapa das lagunas com a malha sobreposta à região do domínio. E abaixo, o domínio da modelagem com batimetria.



2.2 Maré e Vento

As variações de nível d'água, inseridas como condições de contorno nas fronteiras marítimas, foram obtidas a partir das constantes harmônicas e são mostradas na Tabela 1. A variação do nível do mar na embocadura do Canal de Itajuru e no canal projetado na enseada da Praia Seca foi modelada através de curvas de maré sintética. As constantes harmônicas utilizadas para geração de tais curvas são as do porto de Arraial do Cabo, fornecidas pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), da Marinha do Brasil.

De modo a representar as variações no período simulado, um efeito sintético de maré meteorológica foi imposto pelo modelo e representou os meses de julho e janeiro de 2000, períodos simulados no estudo.

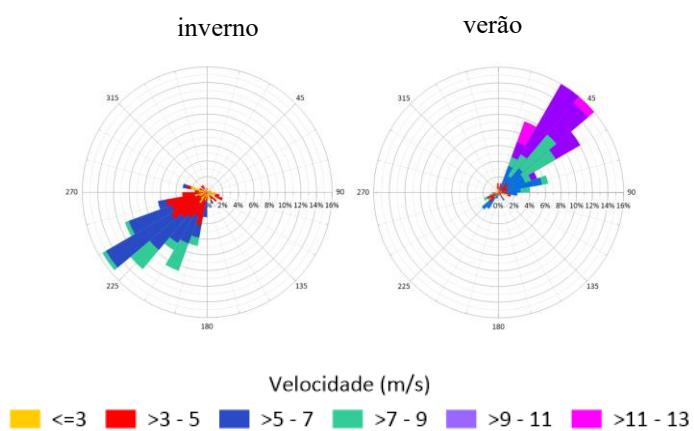
Tabela 1- Constantes harmônicas usadas para prescrição do nível d'água nas fronteiras marítimas do modelo. Obtidas da FEMAR, para o Porto do Forno, em Arraial do Cabo.

Constante	Período (seg)	Amplitude (m)	Fase (grau)
M2	44714.16	0.33	78
S2	43200.00	0.17	88
Mm	2380713.37	0.06	308
K1	86164.09	0.05	147
K2	43082.05	0.05	89
N2	45570.05	0.04	92
Q1	96726.08	0.03	75
L2	43889.83	0.02	92
M4	22357.08	0.02	25
P1	86637.20	0.02	143
M1	89399.69	0.01	46
MNS2	47258.16	0.01	128
O1	92949.63	0.01	87
T2	43259.22	0.01	88
MS4	21972.02	0.01	115
J1	83154.52	0.01	123
MSf	1275721.42	0.01	355
OO1	80301.87	0.01	46
nu2	45453.62	0.01	90
mu2	46338.33	0.01	241
2N2	46459.35	0.01	106

O padrão de ventos predominante na região, onde é inserida a Lagoa de Araruama, apresenta uma direção marcadamente oriunda do quadrante nordeste. No entanto, o período simulado de inverno possui padrões no quadrante sudoeste, mostrado na Figura 3. A rosa dos ventos corresponde a uma série temporal de 31 dias, referente aos meses de julho e janeiro de 2000.

Os dados de vento utilizados foram obtidos da base de dados do NCEP - National Centers for Environmental Prediction, que pertence a agência americana NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration. Estes dados são produto de reanálise e estão disponíveis em <https://rda.ucar.edu/>.

Figura 3- Distribuição percentual da ocorrência de ventos utilizados na região da Lagoa de Araruama para julho de 2000 à esquerda, representando o modelo de inverno. À direita, os ventos de janeiro de 2000 representando o modelo de verão.



Os dados hidrológicos referentes às vazões fluviais que são adicionadas à Lagoa de Araruama foram adotados do estudo realizado para Modelagem Hidrodinâmica para Planejamento de Obras de Dragagem e Desobstrução de Canais na Lagoa de Araruama, Rosman (2006).

3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

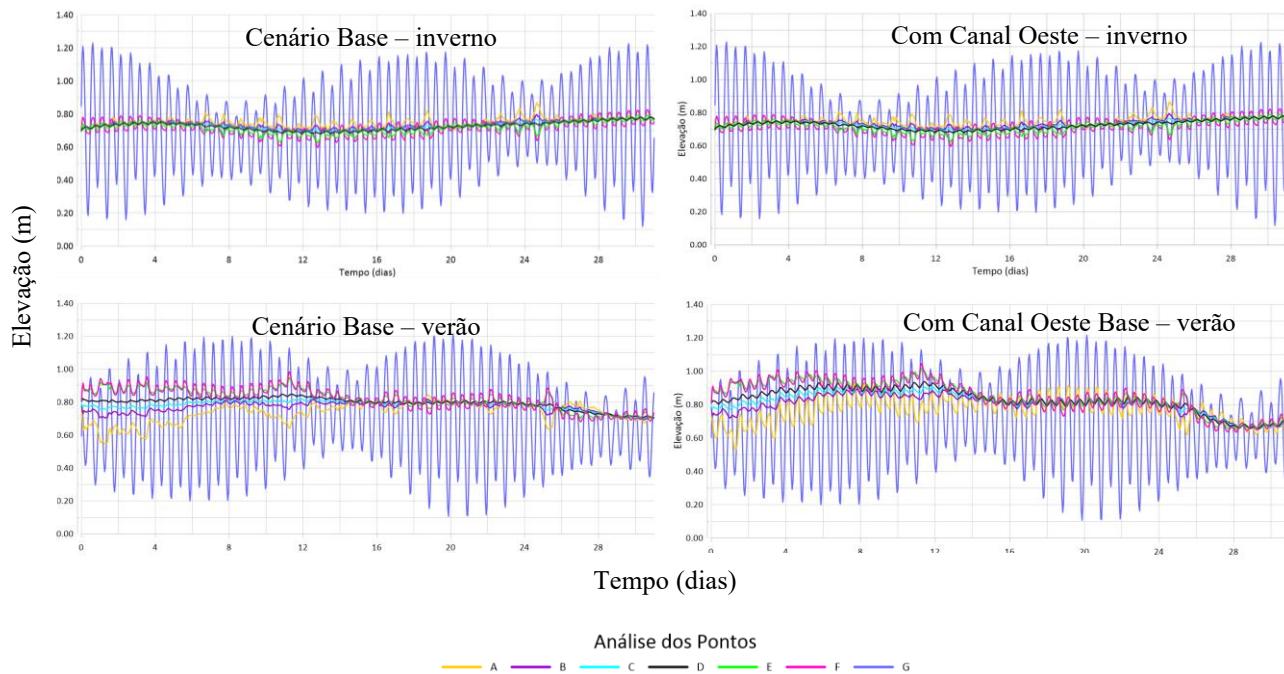
Foi realizada uma análise detalhada em seis pontos distribuídos ao longo da Lagoa de Araruama e em um ponto localizado na região marítima adjacente, conforme apresentado na Figura 4. Esses pontos foram selecionados de modo a representar diferentes setores da laguna, possibilitando uma avaliação espacial abrangente dos efeitos hidrodinâmicos decorrentes dos cenários simulados.

Figura 4- Pontos das estações onde os resultados foram obtidos.



A Figura 5 exibe a variação dos níveis d'água obtidos a partir da modelagem hidrodinâmica. Observa-se, de modo geral, a presença de curvas de maré amortecidas em toda a extensão da laguna, com amplitudes relativamente maiores nas simulações com a presença do Canal Oeste. Esse comportamento sugere que a nova conexão potencialmente intensificaria a propagação da energia de maré para o interior da laguna, favorecendo uma maior renovação das águas.

Figura 5- Níveis d'água obtidos para os cenários estudados.



Nota-se que nas simulações de inverno, as curvas de maré são ainda mais amortecidas evidenciando o baixo grau de comunicação entre a laguna e o oceano. Este fenômeno é agravado pela ocorrência de assoreamento em alguns trechos do Canal de Itajuru, que restringe ainda mais o intercâmbio de volumes de água entre os ambientes lagunar e marinho. Nas simulações representativas do verão, observa-se um aumento do nível médio da água no ponto mais a oeste da laguna nos primeiros dias, resultado do empilhamento provocado pelos ventos predominantes de nordeste, característicos da região nessa estação.

O aumento gradual do nível também pode ser explicado pelo processo de aquecimento do modelo hidrodinâmico, no qual o modelo foi executado por tempo suficiente até que as variações nos níveis d'água atingissem uma condição de equilíbrio satisfatória, adequada para ser utilizada como condição inicial nas simulações definitivas. Simultaneamente, nota-se uma redução do nível médio nos pontos situados mais a leste, evidenciando um gradiente longitudinal de nível d'água induzido pela ação contínua dos ventos.

3.1 Taxa de Renovação

Esta seção aborda a taxa de renovação de água no sistema lagunar, com a apresentação de mapas e gráficos das modelagens realizadas. A análise considera que, no início da simulação, as águas do interior das lagunas são representadas por 0% de água nova, enquanto as águas externas são 100% de água nova. Nas fronteiras abertas, as águas entram como novas e saem como misturadas. As vazões dos afluentes dos rios são consideradas como águas novas, aumentando a renovação do sistema. É

importante ressaltar que águas novas não necessariamente são águas limpas, mas esse estudo não analisa o transporte e dispersão de constituintes trazidos pelos afluentes.

Durante a simulação, as águas originalmente presentes na laguna foram gradativamente misturadas com as águas advindas do mar, resultando em valores percentuais de renovação que variaram de 0% a 100%, dependendo da localização e do momento considerado. Para uma compreensão mais abrangente da dinâmica da renovação, foram realizados três ciclos consecutivos de simulação, totalizando um período de 92 dias. Esta abordagem visa capturar adequadamente o comportamento de movimentação das massas d'água na Lagoa de Araruama, reconhecendo-se o seu histórico de renovação comprometido.

A Figura 6 apresenta as taxas de renovação obtidas para o Cenário Base, evidenciando a evolução gradual dos processos de renovação ao longo do tempo. A visualização progressiva permite identificar com clareza a distribuição espacial da eficiência de renovação na laguna. Nota-se que as porções central e oeste da Lagoa de Araruama demonstraram um desempenho significativamente inferior no período de inverno, com baixas taxas de renovação mesmo após os três meses de simulação. Em contraste, no verão, a renovação se mostrou mais homogênea em toda a laguna, impulsionada pela ação dos ventos predominantes de nordeste, que promovem maior dispersão das massas d'água.

Especificamente nessas regiões, a renovação das massas d'água não ultrapassou os 30% durante o inverno, evidenciando uma baixa eficiência na substituição das águas. Destaca-se ainda que, na porção oeste, a renovação ocorreu exclusivamente pelos aportes fluviais que desaguam naquele setor da laguna. O Canal de Itajuru, que apresenta trechos relativamente assoreados, só apresenta maior importância para a renovação da região leste da laguna.

Figura 6- Taxa de renovação obtidas para o cenário sem o Canal Oeste. Inverno à esquerda e verão à direita. Cenário Base acima e com Canal Oeste abaixo. Período de 1 hora, 5 dias, 31 dias e 92 dias simulados.

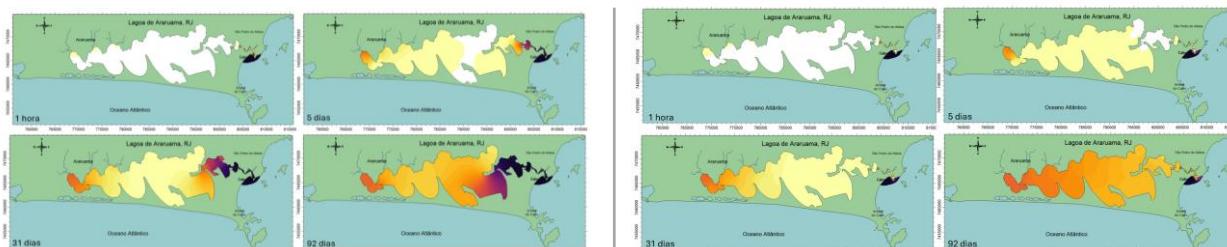
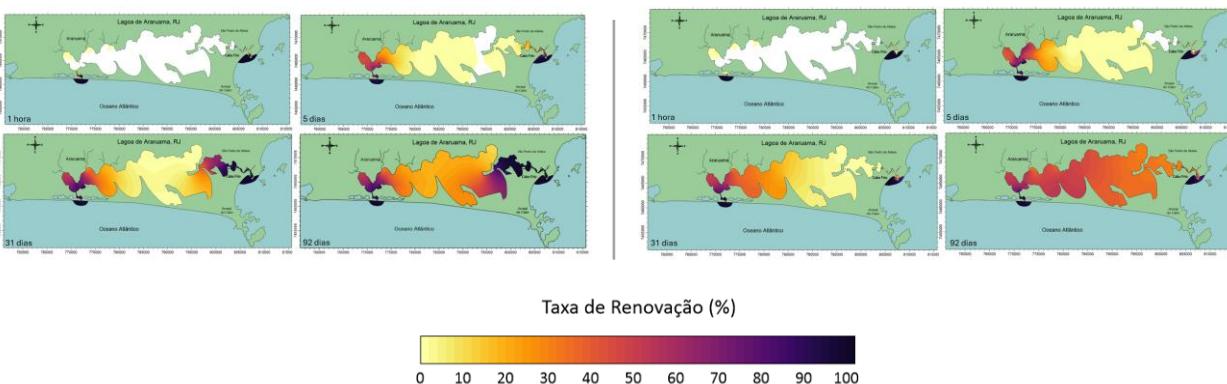


Figura 7 - Taxa de renovação obtidas para o cenário com o Canal Oeste. Inverno à esquerda e verão à direita. Cenário Base acima e com Canal Oeste abaixo. Cenário Base acima e com Canal Oeste abaixo. Período de 1 hora, 5 dias, 31 dias e 92 dias simulados.



Com a inserção do Canal Oeste no sistema, observou-se um aumento significativo nas taxas de renovação (Figura 7), especialmente nas regiões anteriormente mais críticas. As águas da porção central da Lagoa de Araruama passaram a apresentar uma renovação média em torno de 50%, representando uma melhora expressiva em comparação ao Cenário Base durante o período de inverno.

Na porção oeste, a renovação ocorreu de forma satisfatória, com as novas trocas de água induzidas pela abertura do Canal Oeste, proporcionando uma dinâmica mais eficiente na substituição das massas d'água.

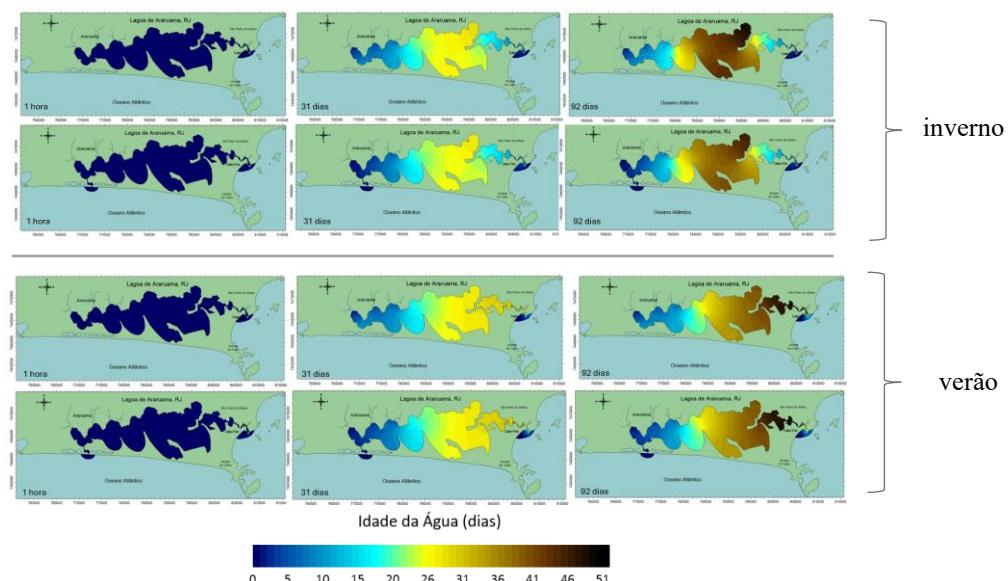
Adicionalmente, os ventos de sudoeste, presentes na configuração das condições de contorno da simulação de inverno, contribuíram para o desempenho mais efetivo da renovação na região central, impulsionando a movimentação das águas em direção ao novo canal e, consequentemente, melhorando o escoamento e a circulação residual no interior da laguna.

3.2 Idade da Água

O modelo de idade da água, aplicado com o objetivo de identificar locais com tendência à estagnação hídrica, indicou que a região central da Lagoa de Araruama é a mais afetada em ambas as simulações, tanto no Cenário Base quanto no Cenário com o Canal Oeste.

Em função da sua configuração física compartimentada, que se configura como um sistema compartimentado, observou-se que as áreas marginais da região central apresentaram idades mais elevadas, ou seja, uma permanência prolongada das massas d'água, sinalizando maior tendência à estagnação. Esse comportamento foi particularmente acentuado na porção norte da região central, onde os processos de renovação são menos eficientes e as condições de circulação hidrodinâmica são mais restritas. A Figura 8 traz os resultados obtidos.

Figura 8 - Comparação entre os valores obtidos para idade da água. Da esquerda para a direita: 1 hora, 31 dias e 92 dias de simulação. Em cima, simulações do Cenário Base e abaixo com a presença do Canal Oeste.



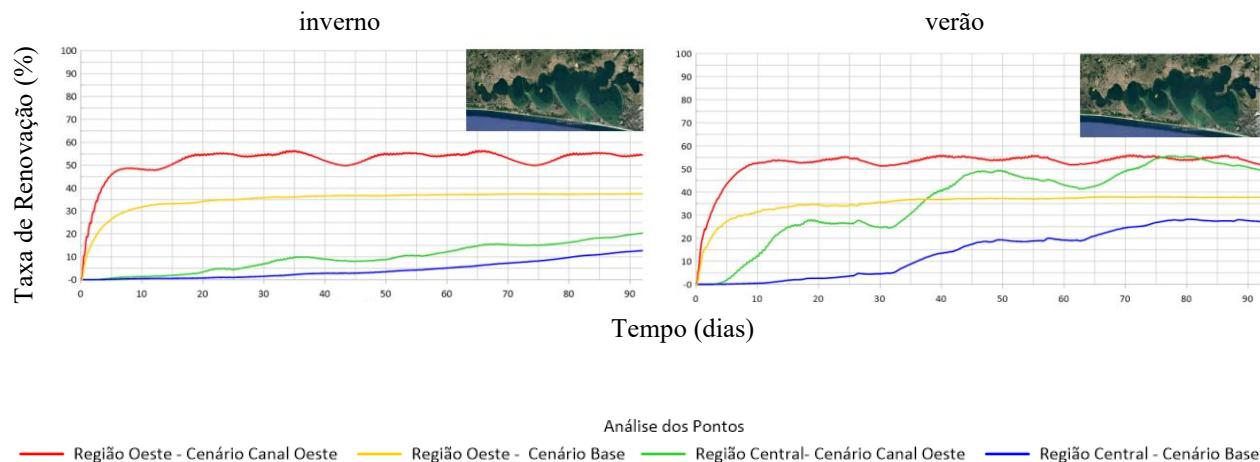
3.3 Análise Comparativa

Ao se traçar uma análise comparativa entre os períodos de inverno e verão, conforme ilustrado na Figura 9, observa-se um aumento nas taxas de renovação nas simulações que consideram a presença do Canal Oeste.

Particularmente na simulação representativa do verão, marcada pela atuação predominante dos ventos de nordeste, característicos da região, as taxas de renovação ao final dos três meses simulados demonstraram um desempenho semelhante ao observado na porção oeste da laguna. Esse resultado ocorre porque os ventos persistentes de nordeste promovem o empilhamento das águas nesta região, favorecendo a renovação mais eficiente das massas d'água naquela área.

Assim, a interação entre a sazonalidade dos ventos e a abertura do Canal Oeste revelou-se fundamental para a melhoria dos processos de renovação, principalmente durante o verão, quando os ventos exercem uma influência mais significativa na hidrodinâmica do sistema.

Figura 9 - Séries temporais das taxas de renovação obtidas na região oeste e central da Lagoa de Araruama.



4. CONCLUSÕES

Os resultados da modelagem computacional evidenciaram que a abertura de um segundo canal na região da Praia Seca tem grande potencial para melhorar a renovação das massas d'água da Lagoa de Araruama, especialmente durante o verão, quando predominam os ventos de leste e nordeste. Ainda assim, mesmo sob condições desfavoráveis de vento, como as predominantes de sudoeste no inverno, os resultados indicaram ganhos significativos na renovação da laguna.

Apesar de o cenário analisado apresentar condições menos propícias à circulação induzida pelo vento, o Canal Oeste demonstrou potencial para incrementar a renovação especialmente nas áreas central e oeste da laguna, tradicionalmente mais afetadas por processos de estagnação. A análise complementar realizada com condições típicas de verão, caracterizadas pelos ventos de nordeste, reforçou o papel positivo da nova ligação, indicando que em cenários mais favoráveis o canal poderia proporcionar uma ainda maior eficiência na renovação das águas.

No entanto, é imprescindível destacar que a abertura de um novo canal de ligação com o mar demandaria uma análise aprofundada sobre os efeitos na salinidade do sistema. A Lagoa de Araruama

possui um caráter hipersalino marcante, e modificações no equilíbrio salino podem gerar impactos significativos na biota, nos usos econômicos locais e na dinâmica ecológica do ambiente lagunar. Assim, são recomendados estudos complementares focados na avaliação das alterações salinas decorrentes da nova ligação.

Além disso, destaca-se que este estudo não contempla a avaliação da estabilidade hidrosedimentológica do Canal Oeste. A criação e manutenção de um canal de maré eficiente e estável requer a implementação de estruturas de engenharia adequadamente dimensionadas, que garantam a longevidade, a funcionalidade e a segurança da nova conexão, prevenindo processos de erosão e assoreamento Silva & Rosman (2016) e Silva et. al (2020).

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

- AGUILERA, L., DOS SANTOS, A. L. F., ROSMAN P.C.C. (2020). Characteristic Hydraulic Times Through Hydrodynamic Modelling: Discussion and Application in Patos Lagoon (RS). COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- CUNHA, A. C. B. (2003). Uma Análise do Sistema Lagunar de Araruama – RJ, com Enfoque Hidrodinâmico. Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- DE PAULA, T. (2009). Análise Hidrodinâmica e de Renovação de Massas d'Água na Lagoa Rodrigo de Freitas através do Uso da modelagem Computacional, Escola Politécnica/UFRJ, Rio de Janeiro.
- GAVA, G.L. (2008). Avaliação de Renovação de Águas na Lagoa de Araruama – RJ, via Abertura de Canal com o Mar no Extremo Oeste. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- MOREIRA, A.L.C. (2001). “Super crescimento de algas na Lagoa de Araruama: consequências, fatores tróficos e biogeoquímicos”. III Encontro Nacional da Cidadania pelas Águas- CREA-RJ.
- ROSMAN, P. C. C. (2006). Modelagem Hidrodinâmica para Planejamento de Obras de Dragagem e Desobstrução de Canais na Lagoa de Araruama, RJ. In: Relatório/Projeto PENO – 5605, Fundação COPPETEC – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- SILVA, R. A. G.; ROSMAN, P. C. C. (2016). Viabilidade Hidro-Sedimentológica de um Canal de Maré Projetado no Oeste da Lagoa de Araruama -RJ, Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 21, n. 1, p. 25 -35.