



T R A B A L H O 2 3

## IMPACTOS DAS MARÉS METEOROLÓGICAS NOS NÍVEIS DE ÁGUA NO SISTEMA LAGUNAR DE JACAREPAGUÁ SOB INFLUÊNCIA DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Monica Frickmann Young Buckmann

Laura Aguilera

Paulo Cesar C. Rosman

Verônica S. de Andrade

**RESUMO:** O Sistema Lagunar de Jacarepaguá é a área costeira mais vulnerável do Brasil, devido à alta densidade populacional e atividades econômicas relevantes. As mudanças climáticas intensificam o risco de inundações, com aumento do nível do mar, chuvas fortes e marés meteorológicas. Neste estudo foram analisados diferentes cenários combinando variações de batimetria (atual e após dragagem), marés astronômicas e meteorológicas e vazões fluviais. Os resultados indicam que a maré meteorológica tem o maior impacto nas cotas máximas d'água, superando os demais fatores. A dragagem proposta melhora a renovação hídrica por meio do aumento do prisma de maré, contribuindo para a qualidade da água. Os cenários de mudanças climáticas tornarão o Sistema mais vulnerável a inundações, ao mesmo tempo em que potencialmente melhorarão a qualidade da água do sistema.

**PALAVRAS-CHAVE:** Vulnerabilidade costeira; Mudanças climáticas; Modelagem Computacional

### INTRODUÇÃO

O Sistema Lagunar de Jacarepaguá ( $22^{\circ}59'11.72''S$ ;  $43^{\circ}23'43.68''W$ ), está localizado na região metropolitana do Rio de Janeiro, a área costeira mais vulnerável do Brasil devido à sua alta densidade populacional e importantes atividades econômicas.

O Maciço da Pedra Branca, o Maciço da Tijuca e o oceano, limitam a área de macrodrenagem de  $280\text{km}^2$  de Jacarepaguá, que representa 25% da área total

da cidade do Rio de Janeiro. As lagoas Marapendi, Tijuca, Camorim e Jacarepaguá formam o Sistema Lagunar. As Lagoas Jacarepaguá e Tijuca se comunicam através da chamada Lagoa Camorim, que na verdade é um canal. Através do Canal de Marapendi, a Lagoa de Marapendi se interliga à Lagoa da Tijuca, que tem comunicação direta com o mar através do Canal da Joatinga, Figura 1.



Fig. 1. Vista aérea do Sistema Lagunar de Jacarepaguá do Google Earth.

Como foi descrito, as Lagoas estão interligadas e têm uma comunicação direta com o mar, tornando salobra a água da lagoa e sendo diretamente influenciadas pelas variações do nível do mar geradas pela maré. O aumento do nível do mar combinado com chuvas fortes, tempestades da ordem de 80 cm e a condição real de assoreamento que foi criada após um episódio de precipitação extrema em 1996, aumentam a exposição da área e a probabilidade de inundação das áreas baixas circundantes.

O Sistema Lagunar de Jacarepaguá passou por um grande crescimento populacional nas últimas décadas, tendo seus moradores praticamente triplicados em 40 anos, e as novas áreas urbanizadas se expandiram sem um planejamento urbano adequado. A consequência dessa falta de planejamento foi o surgimento de muitas comunidades com condições precárias de urbanização e construções irregulares sem saneamento básico, o que causou uma enorme degradação ambiental no sistema lagunar. Além disso, a ocupação das encostas e faixas marginais de rios e lagoas ocorreu sem um planejamento e infraestrutura adequados, (Masterplan,

2013). A condição real de assoreamento, ilustrada na Figura 2, dificulta a troca da água do corpo lagunar e da água do mar, criando problemas de qualidade da água no sistema onde as velocidades são lentas. Para melhorar a qualidade da água, o Conselho Municipal do Rio de Janeiro desenvolveu um projeto de dragagem, (Masterplan, 2013). Este trabalho considera a batimetria final projetada para a maioria dos casos de estudo.



Fig. 2. A situação de assoreamento da Lagoa da Tijuca. Foto de Mario Moscatelli (09/2019).

De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), até 2100 a temperatura global aumentará mais de 1°C e, portanto, o nível médio do mar (MSL) pode atingir uma altitude de 18 a 79 cm. Além disso, estudos mostram que nas últimas décadas o nível médio do mar aumentou de 4 para 6 mm por ano. Considerando as vulnerabilidades costeiras e hidrológicas da zona estudada, é importante avaliar o efeito potencial do aumento do nível do mar nas áreas costeiras, uma vez que intensifica os problemas relacionados à intrusão salina e inundações. Outro problema importante associado ao nível da água no sistema lagunar é o entupimento do sistema de drenagem, que pode causar problemas como inundações, propagação de doenças e pragas de insetos e outros animais.

O governo desenvolveu diferentes programas para proteger e adaptar a cidade aos desafios futuros. Um deles foi o “Estratégia de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Cidade do Rio de Janeiro” (Câmara Municipal do Rio de Janeiro, 2016), que foi realizada com o objetivo de estudar como as mudanças climáticas poderiam afetar a cidade e estabelecer algumas estratégias para mitigar seus impactos futuros. Este estudo faz parte deste programa, com foco na área do Sistema Lagunar de Jacarepaguá e sua vulnerabilidade frente às mudanças climáticas.

O objetivo principal deste trabalho é analisar como o aumento do nível do mar, somado às marés meteorológicas, vazões extremas dos rios e mudanças na batimetria da própria lagoa, influenciam o nível da água do Sistema Lagunar de Jacarepaguá. Especialmente nas áreas mais populosas do entorno do sistema, identificar as áreas mais vulneráveis para as diferentes batimetrias lagunares e estudar o impacto na qualidade da água das variáveis estudadas.

## MÉTODOS

Esta seção apresenta os diferentes cenários de modelagem e a metodologia.

### Cenários

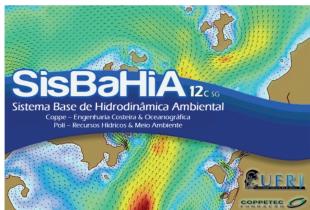
A subida do nível médio do mar associada ao fenômeno das marés de tempestade e ao aumento das chuvas vai elevar os níveis de água dos rios que drenam para as lagoas e, consequentemente, aumentar o risco de inundações. Para avaliar o efeito dessas variáveis na vulnerabilidade do sistema lagunar, foram estabelecidos cenários de mudanças climáticas para 2040. Os cenários consideram diferentes variações no aumento do nível do mar, maré meteorológica, hidrogramas e batimetria dos rios, conforme listado em Mesa 1.

De acordo com o aumento do nível do mar, os casos são separados nos cenários atuais, sem aumento do nível do mar; cenários prováveis com elevações do nível do mar de 10 cm em 2040, assumindo um aumento do MSL de 4 mm/ano; e cenários pessimistas com elevações de 15 cm assumindo um aumento do nível do mar de 6 mm / ano. Esses cenários combinam a ocorrência de maré de tempestade: SS0 considera nenhuma maré de tempestade; SS1 e SS2 incluem uma maré de tempestade sintética com forma senoidal e um pico máximo de 0,4 m e 0,8 m, respectivamente. Diferentes hidrogramas de rios são incluídos para cada combinação representada por: RP25, um hidrograma sintético para um período de retorno de 25 anos; 1,1 RP25 e 1,2 RP25 que considera o hidrograma de RP25 aumentaram 10% e 20% respectivamente. Os cenários consideram duas batimetrias distintas: o caso atual de 2014 como a batimetria medida a partir de uma campanha de campo de 2014 e a batimetria dragada que considera a batimetria planejada do projeto de dragagem.

Tab. 1. Cenários de modelagem.

	Modelo	Elevação do nível do mar (m)	Maré Meteorológica	Hidrogramas	Batimetria
Cenário atual - 2016	Caso 1	0	SS0	RP 25	Dragado
	Caso 2	0	SS1	RP 25	Dragado
	Caso 3	0	SS2	RP 25	Dragado
Cenário provável - 2040	Caso 4	0.1	SS0	1.1 RP 25	Dragado
	Caso 5	0.1	SS1	1.1 RP 25	Dragado
	Caso 6	0.1	SS2	1.1 RP 25	Dragado
Cenário pessimista - 2040	Caso 7	0.15	SS0	1.2 RP 25	Dragado
	Caso 8	0.15	SS1	1.2 RP 25	Dragado
	Caso 9	0.15	SS2	1.2 RP 25	Dragado
	Caso 10	0.15	SS2	1.2 RP 25	2014

## Modelagem Computacional



As simulações computacionais foram realizadas com o SisBaHiA (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental): um sistema profissional de modelos computacionais, cadastrado pela Fundação Coppetec, desenvolvido para projetos, estudos e gestão ambiental de recursos hídricos, (Rosman, 2024).

O Sistema Lagunar de Jacarepaguá é considerado verticalmente homogêneo no espaço e no tempo. Consequentemente, foi utilizado o Modelo Hidrodinâmico 2DH, um modelo hidrodinâmico da linha FIST (Filtrado no Espaço e no Tempo), otimizado para corpos d'água naturais com vazão não sensível à baroclinicidade vertical (ROSMAN, 2015). Dentro da formulação matemática utilizada destacam-se as seguintes características:

- • Resolver as equações completas de Navier-Stokes, considerando a abordagem de águas rasas (aproximação da pressão hidrostática) e a aproximação de Boussinesq.
- • Aplicar modelagem de turbulência baseada em técnicas semelhantes às empregadas na Simulação de Grandes Vórtices (LES - Large Eddy Simulation).
- • Utiliza a Equação de Estado, de acordo com a fórmula de Eckart.
- • No Módulo 2DH, as equações de conservação de quantidade, movimento e equação de continuidade são calculadas em vertical (fluxo bidimensional).

A formulação numérica do modelo hidrodinâmico emprega o Método dos Elementos Finitos com elementos biquadráticos Lagrangeanos sub-paramétricos, para discretização horizontal especial. A discretização temporal é feita por meio de um esquema numérico implícito de diferenças finitas. Os efeitos de inundação e secagem do domínio foram modelados pelo Método Poroso-Rugoso (Rosman, 2015).

## Malha de elementos finitos

Os contornos do domínio foram definidos por meio de imagens do Google Earth. A discretização do domínio utilizou 2514 elementos quadráticos, sendo 2359 quadrangulares e 155 triangulares, contendo 11436 nós de cálculo, Figura 3. A malha é mais refinada em canais de dragagem.

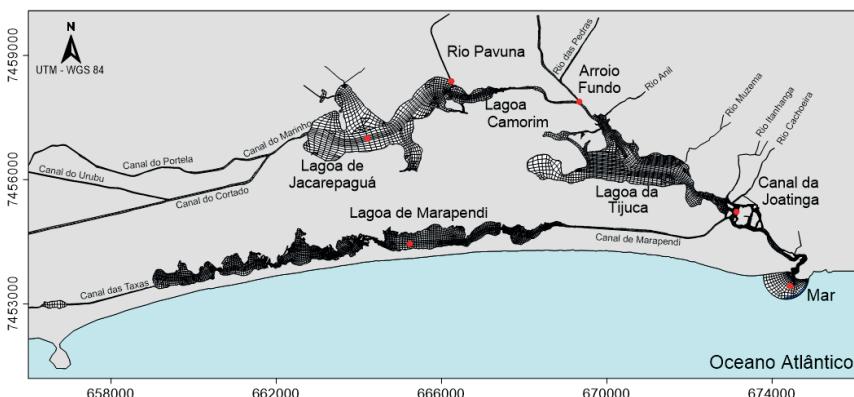


Fig. 3. Malha quadrática de elementos finitos implementada no SisBaHiA e localização das estações.

## DADOS AMBIENTAIS

A seção apresenta os dados ambientais usados nos cenários de modelagem.

### Batimetria

(INEA, 2015) forneceu os dados de batimetria do sistema lagunar considerado para o domínio da modelagem, incluindo os canais de dragagem projetados. A batimetria dos dados marítimos foi obtida através da carta náutica 1506 (1:75.000), da Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil. Os dados de batimetria referem-se ao nível médio do mar de -0,2 m, correspondendo ao Datum Imbituba do IBGE.

A Figura 4 mostra o domínio com os dados batimétricos gerais, com detalhes dos canais dragados destacados na Figura 5.

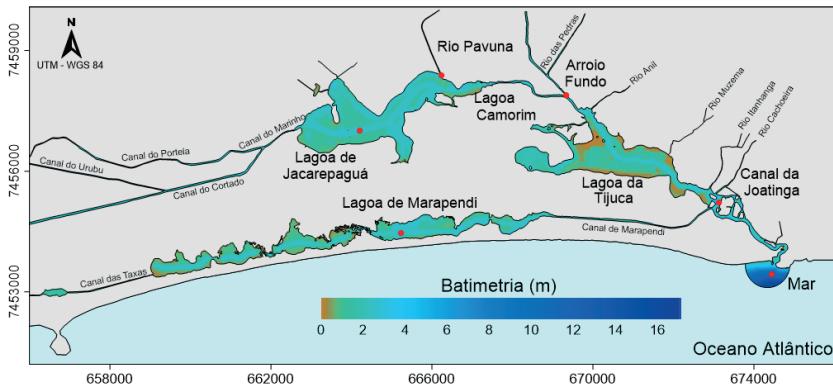


Fig. 4. Batimetria do Sistema Lagunar de Jacarepaguá referiu-se ao IBGE Datum Imbituba, implantado no SisBaHiA.

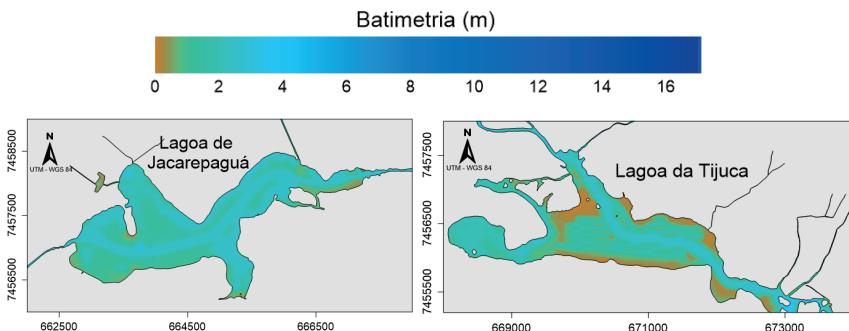


Fig. 5. Detalhe da batimetria nas Lagoas Jacarepaguá e da Tijuca.

## Rugosidade equivalente do fundo

A rugosidade equivalente do fundo refere-se ao tipo de sedimento do leito presente no corpo d'água e, ao mesmo tempo, às formas do fundo moldadas pelo fluxo. De acordo com o MASTERPLAN (2013), o fundo do Sistema Lagunar é composto por lodo na Lagoa da Tijuca e areia média nas demais lagoas e canais. (Rosman, 2015) recomenda um valor de 0,001m para representar a rugosidade equivalente do leito de silte e 0,020m para representar a areia média. A Figura 6 mostra a variação espacial da rugosidade adotada na modelagem.

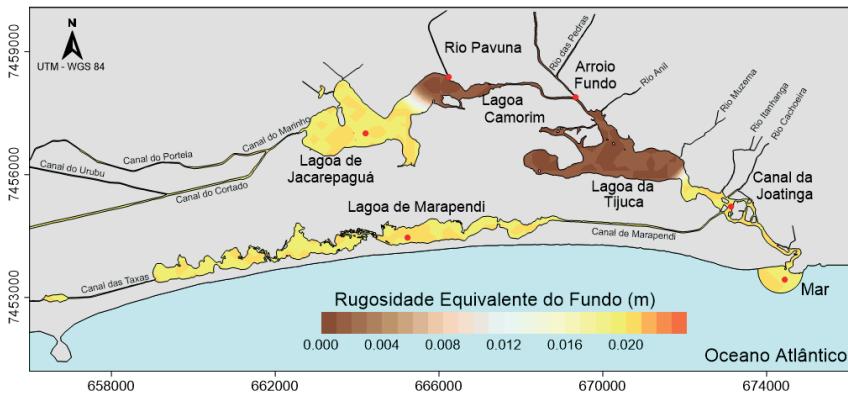


Fig. 6. Distribuição da rugosidade equivalente do fundo usada na modelagem.

## Marés

Marés astronômicas e marés meteorológicas sintéticas foram adicionadas para gerar condições extremas do nível do mar. Marés meteorológicas que sobem e descem acima do nível médio do mar (MSL) em aproximadamente 8 dias com amplitudes de 0,8 m e 0,4 m, e as curvas do nível do mar resultantes foram impostas na fronteira aberta. Esses casos representam a passagem de uma tempestade coincidindo com uma maré de sizígia equinocial.

A Figura 7 mostra um exemplo da maré simulada usada para o Caso 9. Esta curva é a condição de contorno para a fronteira aberta no mar (linha vermelha). A linha azul escura indica a maré meteorológica sintética de 0,80m de pico máximo, e a linha azul clara representa a maré astronômica. O valor da subida do nível do mar considerado neste cenário foi de 0,15m.

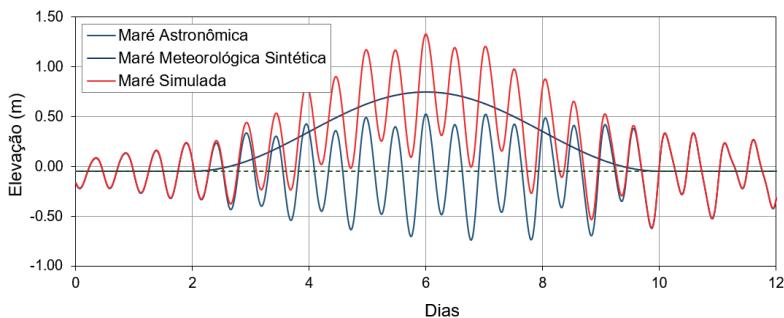


Fig. 7. Curva sintética de maré meteorológica ao longo da simulação de 12 dias para o Caso 9.

## Hidrogramas de afluentes

Os principais rios contribuintes da bacia hidrográfica do Complexo Lagunar de Jacarepaguá, originados das encostas dos Maciços da Pedra Branca e da Tijuca, estão descritos a seguir de acordo com a respectiva lagoa receptora.

1. Lagoas Jacarepaguá/Camorim: Canal da Portela, Urubu Chanel, Canal do Cortado, Vargem Pequena, Cancela, Calembá, Marinho, Camorim, Caçambê, Pavuninha e Arroio Pavuna.
2. Lagoa da Tijuca: Rios Arroio Fundo, Anil, Rio das Pedras, Muzema, Itanhangá, Cachoeira.
3. Lagoa de Marapendi: Canal das Taxas.

Os hidrogramas dos principais afluentes consideraram um período de 12 dias com o pico da cheia coincidindo com as maiores elevações da maré final de cada caso. São hidrogramas sintéticos para um período de retorno de 25 anos acrescido de 10% no cenário Provável e 20% no cenário Pessimista.

Para os Canais da Portela, Cortado e Urubu foram adotados 70%, 20% e 10% do hidrograma do Rio Marinho, respectivamente. Com base no Masterplan (2013) para o Rio Itanhangá a precipitação média considerada foi de  $0,0693 \text{ m}^3/\text{s}$  e para o Canal das Taxas foi de  $0,0046 \text{ m}^3/\text{s}$ . Esses valores são vazões médias do período de chuvas calculadas por um Método Racional. A Figura 7 mostra exemplos de hidrogramas de alguns rios com atraso de horas em relação ao pico da maré na estação Mar.

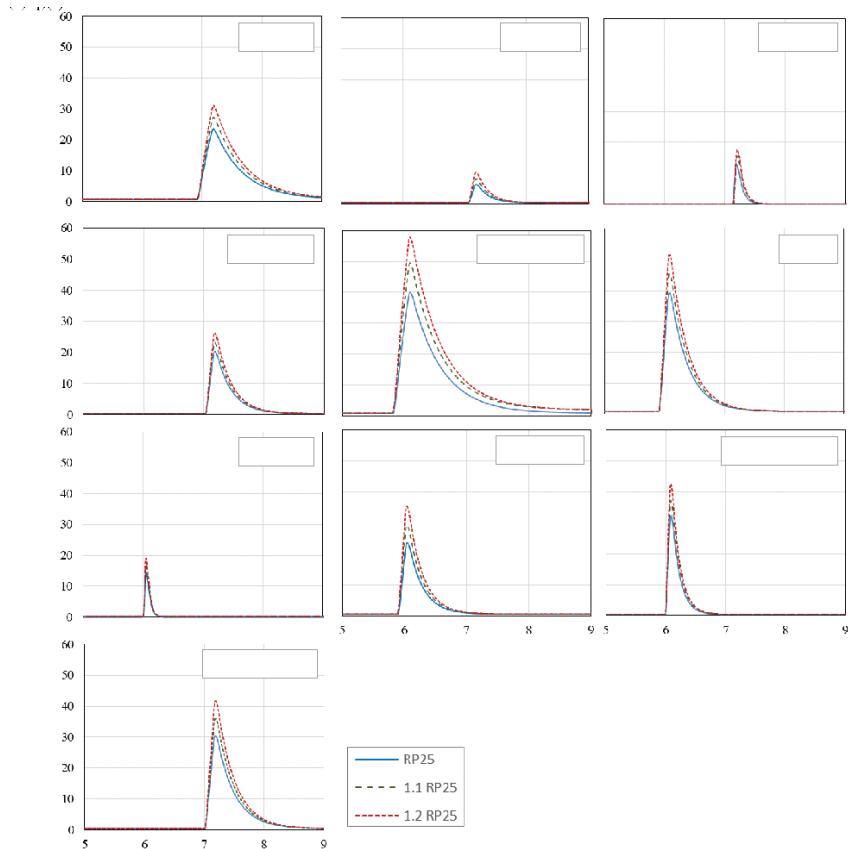


Fig. 7. Hidrogramas para os principais rios tributários do sistema com atraso em dias em relação ao pico da maré na estação do Mar.

## RESULTADOS

O estudo hidrodinâmico calculou o prisma de maré e investigou as elevações máximas e o tempo de ocorrência nas estações selecionadas. As elevações máximas ocorreram nos casos 9 e 10.

A maré meteorológica produziu elevações máximas, com um aumento médio de 0,73 m quando ocorreu o aumento de 0 m a 0,80 m. A situação atual de assoreamento, representada pelo Caso 10, produz maiores elevações de água na lagoa mais interna.

O nível da foz do sistema de drenagem urbana próximo ao Sistema Lagunar de Jacarepaguá foi estabelecido pela Câmara Municipal em 0,92m acima do nível médio do mar (Rio Águas, 2010). Os locais onde os níveis de água calculados ficaram

acima de 0,92 m serão inundadas e o sistema de drenagem será bloqueado. Os sistemas de drenagem próximos a esses locais são potencialmente vulneráveis a problemas devido a inundações.

Os resultados do prisma de maré do sistema lagunar, para todos os casos, indicam que ele é mais sensível a tempestades e vazões do rio do que a mudanças no nível médio do mar. Esta conclusão decorre da variação da resistência ao escoamento devido à rugosidade do fundo. O prisma das marés, como esperado, é aumentado quando a maré de tempestade aumenta e é reduzido quando o fluxo do rio aumenta.

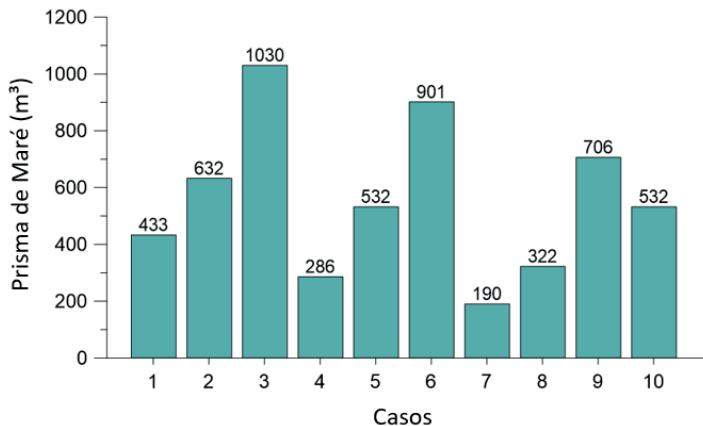


Fig. 8. Prisma de maré calculado no Canal da Joatinga.

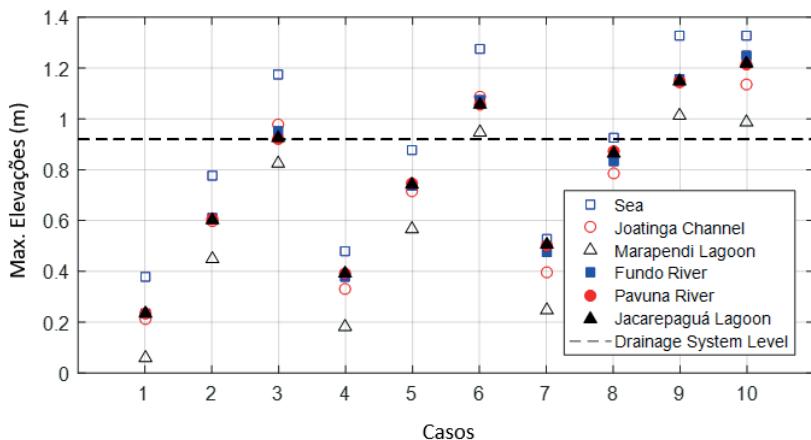


Fig. 9. Elevações máximas nas estações especificadas.

Foram calculados os intervalos de tempo entre a ocorrência da elevação máxima em cada estação e a elevação máxima na estação Sea. Os maiores intervalos de tempo ocorreram nas margens norte do sistema lagunar, a área mais populosa próxima à água, variando de 13 a 17 horas, nos Casos 3, 6, 9 e 10. Assim, haveria tempo de alerta suficiente para a população, ações para evitar inundações poderiam ser tomadas e o bloqueio do sistema de drenagem poderia ser controlado. Portanto, para fins de alerta, um sistema de monitoramento do nível da água em tempo real deve ser instalado próximo à estação Sea.

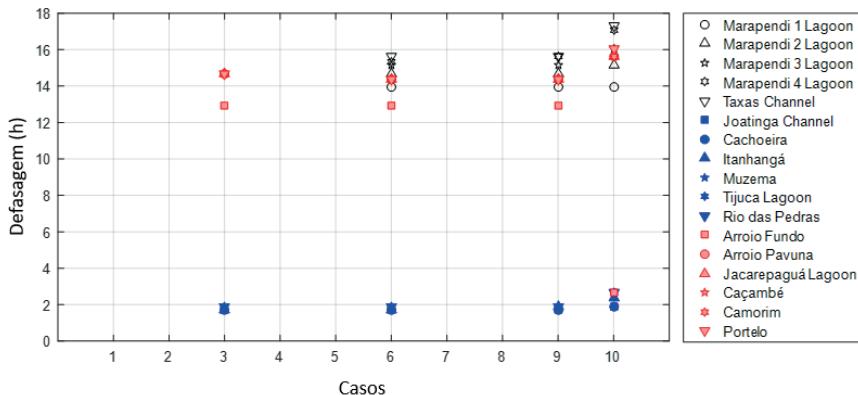


Fig. 10. Intervalo de tempo para as elevações máximas superiores ao limite do sistema de drenagem, em comparação com o tempo da elevação máxima da água na Estação Marítima.

## CONCLUSÃO

Considerando diferentes cenários de agentes hidrológicos, meteorológicos e oceanográficos no Sistema Lagunar de Jacarepaguá, a maré meteorológica tem o maior impacto nas elevações máximas de água no interior das lagoas, superando o impacto do aumento do nível médio do mar, vazão do rio e alterações na batimetria.

O projeto de dragagem planejado permitiria uma melhor renovação da água nas lagoas, devido a um prisma de maré mais alto, e reduziria em cerca de 7,3 cm a elevação máxima na parte norte e mais povoada do sistema. Finalmente, futuras mudanças climáticas que envolvem aumento do nível do mar, maiores marés meteorológicas e fluxos fluviais mais fortes, tornarão o Sistema Lagunar de Jacarepaguá mais vulnerável em termos de possíveis inundações, mas melhorarão a qualidade da água do sistema.

## REFERÊNCIAS

- City Council of Rio de Janeiro (2016). "Climate Change Adaptation Strategy for the City of Rio de Janeiro". Centro de Estudos Sobre Meio Ambiente e Mudanças Climáticas.
- Falcão, M.M. (1995). "Estudo da Circulação Hidrodinâmica no Sistema Lagunar de Jacarepaguá". M.Sc. Programa de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Inea (2015). "Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) das obras de prolongamento do molhe existente na entrada do Canal da Joatinga e as melhorias da circulação hídrica do Complexo Lagunar de Jacarepaguá". Inea – Instituto Estadual do Ambiente.
- Masterplan (2013). "Relatório Ambiental Simplificado das Obras de Recuperação Ambiental do Complexo Lagunar de Jacarepaguá". Masterplan – Consultoria de Projetos e Execução Ltda. Rio de Janeiro, p.450.
- Rio Águas (2010): "Instruções técnicas para elaboração de estudos hidrológicos e dimensionamento hidráulico de sistemas de drenagem urbana", Prefeitura da Cidade de Rio de Janeiro. Subsecretaria de Gestão de Bacias Hidrográficas – Rio Águas.
- Rosman, P.C.C. (2024). "Referência técnica do SisBaHiA, Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental". Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia - RJ. < [www.sisbahia.coppe.ufrj.br](http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br) >.
- Rosman, P.C.C. (2015). "Recuperação Ambiental do Complexo Lagunar de Jacarepaguá – RJ / R1 – Relatório de Caracterização Hidrodinâmica e Intrusão Salina na Situação Atual". Fundação Coppetec, PENO19330, Rio de Janeiro.