

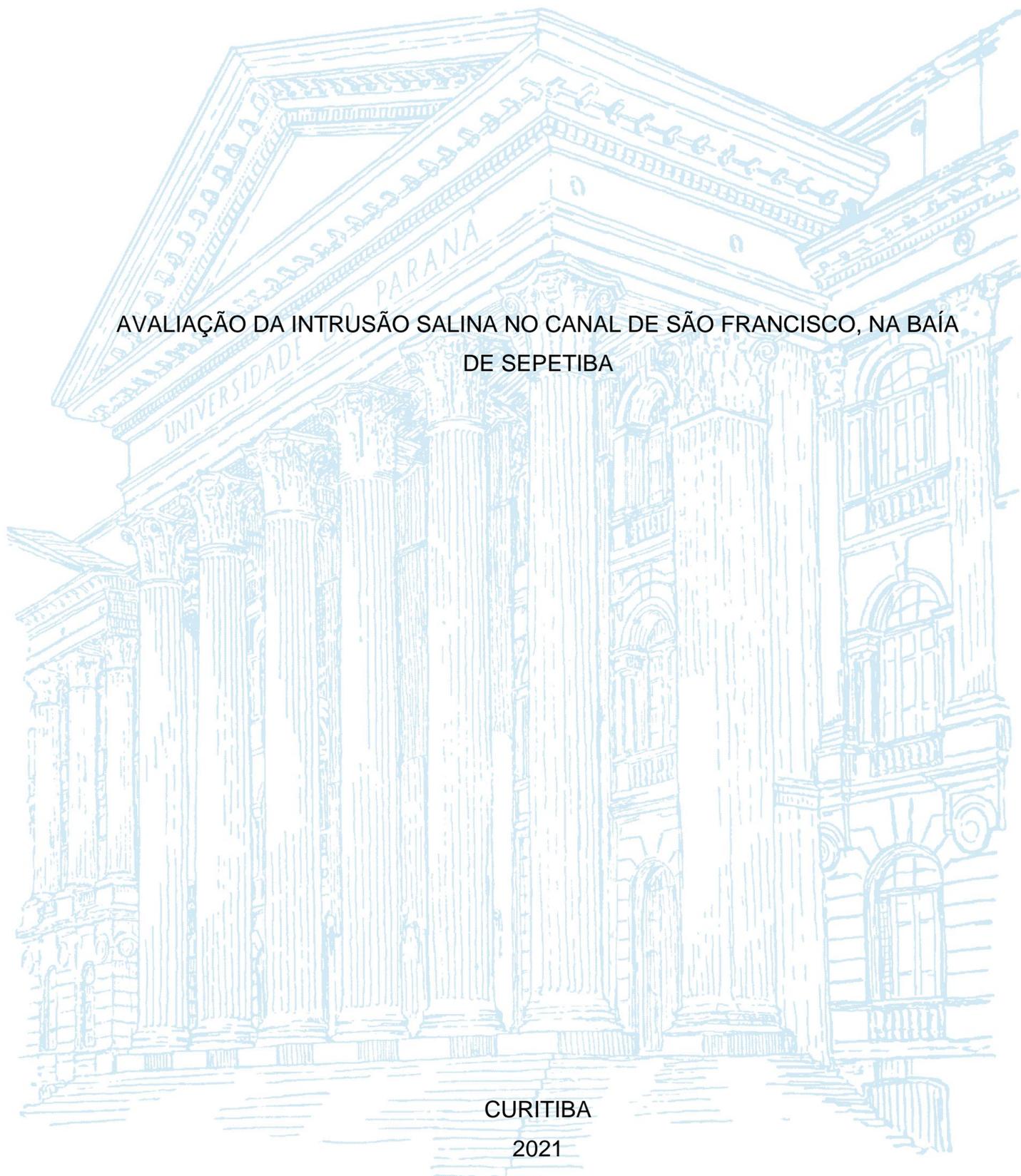
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

INGRID LAYS GARCIA DA SILVA

AValiação da intrusão salina no canal de São Francisco, na Baía
de Sepetiba

CURITIBA

2021



INGRID LAYS GARCIA DA SILVA

AVALIAÇÃO DA INTRUSÃO SALINA NO CANAL DE SÃO FRANCISCO, NA BAÍA
DE SEPETIBA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Ambiental, Setor de
Tecnologia, Universidade Federal do Paraná,
como requisito à obtenção do Título de Bacharel
em Engenharia Ambiental.

Orientadora: Profa. Dra. Cynara de Lourdes da
Nóbrega Cunha

CURITIBA

2021



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

TERMO DE APROVAÇÃO DE PROJETO FINAL

INGRID LAYS GARCIA DA SILVA

AVALIAÇÃO DA INTRUSÃO SALINA NO CANAL DE SÃO FRANCISCO, NA BAÍA DE SEPETIBA

Projeto Final de Curso, aprovado como requisito parcial para a obtenção do Diploma de Bacharel em Engenharia Ambiental no Curso de Graduação em Engenharia Ambiental do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, com nota 83, pela seguinte banca examinadora:

Orientador(a): Cynara de Lourdes da Nóbrega Cunha
Cynara de Lourdes da Nóbrega Cunha
Departamento Engenharia Ambiental UFPR

Membro(a) 1: Michael Mannich
Michael Mannich
Departamento de Engenharia Ambiental UFPR

Membro(a) 2: Ada Scudeleri
Ada Scudeleri
Departamento de Engenharia civil e ambiental / UFRN

Curitiba, 17 de dezembro de 2021

RESUMO

A intrusão salina é um processo natural que ocorre nos estuários, local onde as águas fluviais se encontram com as águas salinas. O presente trabalho avaliou a intrusão salina no canal de São Francisco, localizado na baía de Sepetiba no estado do Rio de Janeiro, para duas condições de vazão do canal, a vazão média, $Q_{\text{méd}}$, e a vazão $Q_{7,10}$. No estudo foi realizada a simulação de um modelo hidrodinâmico acoplado ao modelo de transporte de sal, usando o sistema computacional SisBaHiA[®]. Esse sistema é muito utilizado em corpos de águas naturais para estudos da hidrodinâmica e dispersão. Os maiores alcances da intrusão salina no canal de São Francisco ocorrem com vazões menores ($Q_{7,10}$), pois a maré adentra com maior facilidade. Comparando o verão com o inverno, a maré alcança sua maior distância da foz em direção ao canal no inverno, em aproximadamente 6.000 metros da foz. Os resultados encontrados mostram que as vazões fluviais têm influência direta no avanço da intrusão salina dentro do canal. Os pontos de outorga para captação ao longo do canal podem ter sua captação comprometida devido a redução da vazão do canal. Faz-se necessário estudos posteriores afim de avaliar como crises hídricas futuras e o aumento da população irão afetar a intrusão salina no canal de São Francisco.

Palavras-chave: Intrusão salina. Sepetiba. SisBaHiA[®].

ABSTRACT

Saline intrusion is a natural process that occurs in the estuary, place where fluvial waters meet the saline waters. The present work evaluated the saline intrusion in the São Francisco channel, located in the bay of Sepetiba in the Rio de Janeiro state, for different scenarios: $Q_{\text{méd}}$ summer, $Q_{7,10}$ summer, $Q_{\text{méd}}$ winter and $Q_{7,10}$ winter. In the study a simulation of a hydrodynamic model coupled with a salt transportation model was performed, through SisBaHiA[®] software. This system is widely used in natural water bodies for hydrodynamic and dispersion studies. The greatest reach of the saline wedge on the São Francisco channel occurs with smaller flows ($Q_{7,10}$), because the tide comes more easily. The tide reaches its greatest distance from the mouth towards the channel (at 6,000 meters from the mouth) in winter, while in summer it presents more discreet distances. The results found show that fluvial flows directly influence the advancement of the saline wedge inside the channel. The concession points for capitation along the channel may be committed due to the reduction in flow channel. Further studies are necessary to assess how future hydric crisis and the population increase affect the salinity of the São Francisco channel.

Keyword: Saline Intrusion. Sepetiba. SisBaHiA[®].

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - LOCALIZAÇÃO DA BAÍA DE SEPETIBA	9
FIGURA 2 – DIAGRAMA UNIFILAR DAS TRANSPOSIÇÕES NA BACIA DO RIO GUANDU.....	12
FIGURA 3 - BACIA DO RIO GUANDU E GUANDU MIRIM	13
FIGURA 4 - DISTRIBUIÇÃO DAS ATIVIDADES QUE POSSUEM OUTORGA NA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO GUANDU	14
FIGURA 5 - ESQUEMA DE UM ESTUÁRIO BEM MISTURADO.....	15
FIGURA 6 - ESQUEMA DE UM ESTUÁRIO PARCIALMENTE MISTURADO.....	16
FIGURA 7 - ESQUEMA DE UM ESTUÁRIO TIPO CUNHA SALINA	17
FIGURA 8 - CANAL DE SÃO FRANCISCO COM AS CAPTAÇÕES PRÓXIMAS A EMBOCADURA.....	18
FIGURA 9 - LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE OBTENÇÃO DOS DADOS	22
FIGURA 10 - MALHA E DOMÍNIO DE MODELAGEM DA BAÍA DE SEPETIBA.....	23
FIGURA 11 - BATIMETRIA DA BAÍA DE SEPETIBA UTILIZADA NO DOMÍNIO DE MODELAGEM.....	24
FIGURA 12 - AMPLITUDE DA RUGOSIDADE DE FUNDO UTILIZADO NO DOMÍNIO DE MODELAGEM DA BAÍA DE SEPETIBA.....	25
FIGURA 13 - CURVA DE MARÉ ASTRONÔMICA PARA O MÊS DE JANEIRO DE 2019, OBTIDA A PARTIR DAS CONSTANTES HARMÔNICAS PARA A ILHA GUAÍBA.....	26
FIGURA 14 - CURVA DE MARÉ ASTRONÔMICA PARA O MÊS DE JULHO DE 2019, OBTIDA A PARTIR DAS CONSTANTES HARMÔNICAS PARA A ILHA GUAÍBA.....	27
FIGURA 15 – ROSAS DE DISTRIBUIÇÃO DOS VENTOS NAS ESTAÇÕES EM JANEIRO DE 2019.....	29
FIGURA 16 - ROSAS DE DISTRIBUIÇÃO DOS VENTOS NAS ESTAÇÕES EM JULHO DE 2019.....	30
FIGURA 17 – ELEVAÇÃO NO ANO DE 2019 NO PONTO 1	31
FIGURA 18 - ELEVAÇÃO NO ANO DE 2019 NO PONTO 2	32
FIGURA 19 - SALINIDADE AO LONGO DO ANO DE 2019 PARA DIFERENTES PROFUNDIDADES NO PONTO 1	33

FIGURA 20 - SALINIDADE AO LONGO DO ANO DE 2019 PARA DIFERENTES PROFUNDIDADES NO PONTO 2	33
FIGURA 21 - LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES A, B, C E CANAL_1 NA BAÍA DE SEPETIBA.....	36
FIGURA 22 - ELEVAÇÃO NAS ESTACÕES A, B, C E CANAL_1 ENTRE 20/01/2019 E 24/01/2019 PARA O CENÁRIO DE $Q_{MÉD}$	37
FIGURA 23 - COMPONENTES LESTE-OESTE DA VELOCIDADE NAS ESTACÕES A, B, C E CANAL_1 PARA O CENÁRIO $Q_{MÉD}$ NO PERÍODO DE 16 /01/2019 A 24/01/2019	38
FIGURA 24 - COMPONENTES DE VELOCIDADE NORTE-SUL NA BAÍA DE SEPETIBA NAS ESTACÕES A, B, C E CANAL_1 PARA O CENÁRIO $Q_{MÉD}$ NO PERÍODO DE 16 /01/2019 A 24/01/2019.....	39
FIGURA 25 - CAMPO DE CORRENTES NA BAÍA DE SEPETIBA, EM INSTANTE DE ENCHENTE, EM 22/01/2019 ÀS 2H15MIN, PARA CENÁRIO DE $Q_{MÉD}$	40
FIGURA 26 - SALINIDADE NAS ESTAÇÕES A, B, C E CANAL_1 PARA CENÁRIO DE $Q_{MÉD}$ E $Q_{7,10}$ DURANTE O MÊS DE JANEIRO DE 2019	41
FIGURA 27 - DISTRIBUIÇÃO DE SALINIDADE NA BAÍA DE SEPETIBA, NO INSTANTE 22/01/2019 ÀS 2H00MIN, PARA CENÁRIO DE $Q_{MÉD}$, E A LOCALIZAÇÃO DOS PERFIS LONGITUDINAIS.....	42
FIGURA 28 - DISTRIBUIÇÃO DE SALINIDADE NA BAÍA DE SEPETIBA, NO INSTANTE 22/01/2019 ÀS 2H00MIN, PARA CENÁRIO DE $Q_{7,10}$, E A LOCALIZAÇÃO DOS PERFIS LONGITUDINAIS.....	42
FIGURA 29 - SALINIDADE AO LONGO DO PERFIL LONGITUDINAL NO INTERIOR DA BAÍA DE SEPETIBA, PARA O INSTANTE 22/01/2019 ÀS 2H00MIN PARA OS CENÁRIOS $Q_{MÉD}$ E $Q_{7,10}$	43
FIGURA 30 - SALINIDADE AO LONGO DO PERFIL LONGITUDINAL DO CANAL DE SÃO FRANCISCO PARA O INSTANTE 22/01/2019 ÀS 2H00MIN PARA OS CENÁRIOS $Q_{MÉD}$ E $Q_{7,10}$	44
FIGURA 31 - ELEVAÇÃO NAS ESTACÕES A, B, C E CANAL_1 ENTRE 05/07/2019 E 09/07/2019 PARA O CENÁRIO DE $Q_{MÉD}$	45
FIGURA 32 - COMPONENTES DE VELOCIDADE LESTE-OESTE NA BAÍA DE SEPETIBA PARA $Q_{MÉD}$ NO PERÍODO DE 05/07/2019 A 09/07/2019	46
FIGURA 33 - COMPONENTES NORTE-SUL DA VELOCIDADE NA BAÍA DE SEPETIBA PARA $Q_{MÉD}$ NO PERÍODO DE 05/07/2019 A 09/07/2019	47

FIGURA 34 - SALINIDADE NAS ESTAÇÕES A, B, C E CANAL_1 PARA CENÁRIO DE $Q_{MÉD}$ E $Q_{7,10}$ DURANTE O MÊS DE JULHO DE 2019	48
FIGURA 35 - DISTRIBUIÇÃO DE SALINIDADE NA BAÍA DE SEPETIBA, NO INSTANTE 03/07/2019 ÀS 14H00MIN, PARA CENÁRIO DE $Q_{MÉD}$, E A LOCALIZAÇÃO DOS PERFIS LONGITUDINAIS.....	49
FIGURA 36 - DISTRIBUIÇÃO DE SALINIDADE NA BAÍA DE SEPETIBA, NO INSTANTE 03/07/2019 ÀS 14H00MIN, PARA CENÁRIO DE $Q_{7,10}$, E A LOCALIZAÇÃO DOS PERFIS LONGITUDINAIS.....	49
FIGURA 37 - PERFIL DA SALINIDADE LONGITUDINAL NO INTERIOR DA BAÍA DE SEPETIBA PARA O CENÁRIO DE $Q_{MÉD}$ e $Q_{7,10}$ NO VERÃO E INVERNO	50
FIGURA 38 - PERFIL DA SALINIDADE LONGITUDINAL DO CANAL DE SÃO FRANCISCO PARA O CENÁRIO DE $Q_{MÉD}$ e $Q_{7,10}$ NO VERÃO E INVERNO.....	51

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - VALORES SUGERIDOS PARA A AMPLITUDE EFETIVA DA RUGOSIDADE EQUIVALENTE DO FUNDO EM RELAÇÃO AO TIPO DE SEDIMENTO	24
TABELA 2 - CONSTANTES HARMÔNICAS DA MARÉ	26
TABELA 3 - VAZÕES $Q_{\text{méd}}$ E $Q_{7,10}$ DA BACIA DO GUANDU.....	34

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	6
2 OBJETIVOS	8
2.1 OBJETIVOS GERAIS.....	8
2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	8
3 REFERENCIAL TEÓRICO	9
3.1 ÁREA DE ESTUDO.....	9
3.2 INTRUSÃO SALINA EM ESTUÁRIOS	14
3.3 MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS	19
3.3.1 MODELOS NUMÉRICOS.....	19
3.3.2 MODELO HIDRODINÂMICO E EULERIANO	20
4 METODOLOGIA	22
4.1 DOMÍNIO DE MODELAGEM	22
4.2 FORÇANTES HIDRODINÂMICOS	25
4.3 CENÁRIOS.....	34
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
5.1 CENÁRIO VERÃO	36
5.1.1 CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA	36
5.1.2 SALINIDADE	40
5.2 INVERNO.....	45
5.2.1 CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA.....	45
5.2.2 SALINIDADE	47
6 CONCLUSÃO	52
REFERÊNCIAS	54

1 INTRODUÇÃO

A intrusão salina é um processo natural que ocorre nos estuários, local onde as águas doces se encontram com as águas salinas. O alcance dessa intrusão nos estuários pode se modificar com a maré e com a descarga fluvial, a qual varia conforme as estações do ano e pode ser alterada por fenômenos globais, como as mudanças climáticas. Esse processo modifica a salinidade no trecho atingido, ocasionando mudanças na fauna e na flora, afetando também a população e as indústrias presentes no entorno. Além disso, a intrusão salina pode provocar o represamento da água no leito do rio; com esse represamento, os empreendimentos que possuem outorga não conseguem captar água doce. Outro problema associado ao represamento é a piora na qualidade das águas, pois os efluentes lançados ficam aprisionados no leito do rio.

A descarga fluvial é um dos principais fatores que influenciam na intrusão salina em estuários. Para se avaliar qual o alcance e impacto do adentramento das águas salinas, pode-se utilizar a modelagem computacional, que permite simular diferentes condições de vazões. Na modelagem computacional, os processos complexos são integrados, sendo possível prever cenários futuros, além de reproduzir o cenário atual.

A baía de Sepetiba está localizada no Estado do Rio de Janeiro, na região Sudeste do Brasil, e recebe uma expressiva descarga fluvial. A profundidade da baía varia entre 2,0 a 12,0 m, com uma profundidade média de 5,7 m. A região é de micromaré, com regime de maré é do tipo semi-diurno, com desigualdade diurna. Os sedimentos dominantes são silte e argila, com taxa de sedimentação estimada de 0,30 a 1,0 cm por ano. Os ventos são dos quadrantes Sul e Oeste-Sudoeste, com predominância da primeira (SEMADS, 2001). Um dos principais deságues na baía é o canal de São Francisco, que possui diversos pontos de captação de água para uso industrial e para o abastecimento público. O Canal de São Francisco recebe água do rio Guandu, que abastece a cidade do Rio de Janeiro, mas que anteriormente possuía pequena vazão e necessitou transpor água do rio Paraíba do Sul. A vazão do canal não varia significativamente, devido a presença de diversos reservatórios no rio Guandu que controlam a vazão. A região sofreu com estiagens há alguns anos atrás, chegando a diminuir a vazão do canal para garantir o abastecimento de

água. Com essa diminuição, a intrusão salina no canal teve maior alcance, afetando as indústrias que captavam água doce (JORDÃO, 2017).

Neste contexto, é possível realizar modelagens computacionais a fim de se avaliar qual o avanço da cunha salina no estuário. Um dos sistemas de modelos ambientais que pode realizar a modelagem em corpos de água é o SisBaHiA® (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental), amplamente utilizado para modelagem ambiental de regiões costeiras. O SisBaHiA® é um conjunto de modelos computacionais para corpos d'água naturais, desenvolvido pela Engenharia Costeira e Oceanografia do Programa de Engenharia Oceânica da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Temperatura e salinidade são os dois escalares que podem ser considerados ativos. Para isso, é necessário realizar um acoplamento dos modelos de circulação e de transporte de sal/calor, que são geradores de gradientes de densidade, que irão influir na circulação hidrodinâmica; a modelagem de seu transporte faz parte da modelagem hidrodinâmica e os modelos hidrodinâmico e de transporte de salinidade/calor são acoplados e, por isso, são computados simultaneamente. Neste trabalho, as simulações computacionais para o problema de intrusão salina consideram que os efeitos de gradientes de densidade serão devidos apenas a salinidade (ROSMAN, 2021).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GERAIS

Este trabalho tem como objetivo avaliar o alcance da intrusão salina no Canal de São Francisco, através do uso da modelagem computacional, usando o SisBaHiA®.

2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

Os seguintes objetivos específicos são estabelecidos:

- Análise e tratamento de dados existentes para implantação e desenvolvimento dos modelos;
- Definição das vazões para o Canal de São Francisco;
- Simulações dos diferentes cenários para os modelos de circulação hidrodinâmica e transporte de sal;
- Avaliação do alcance da intrusão salina para os diferentes cenários.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

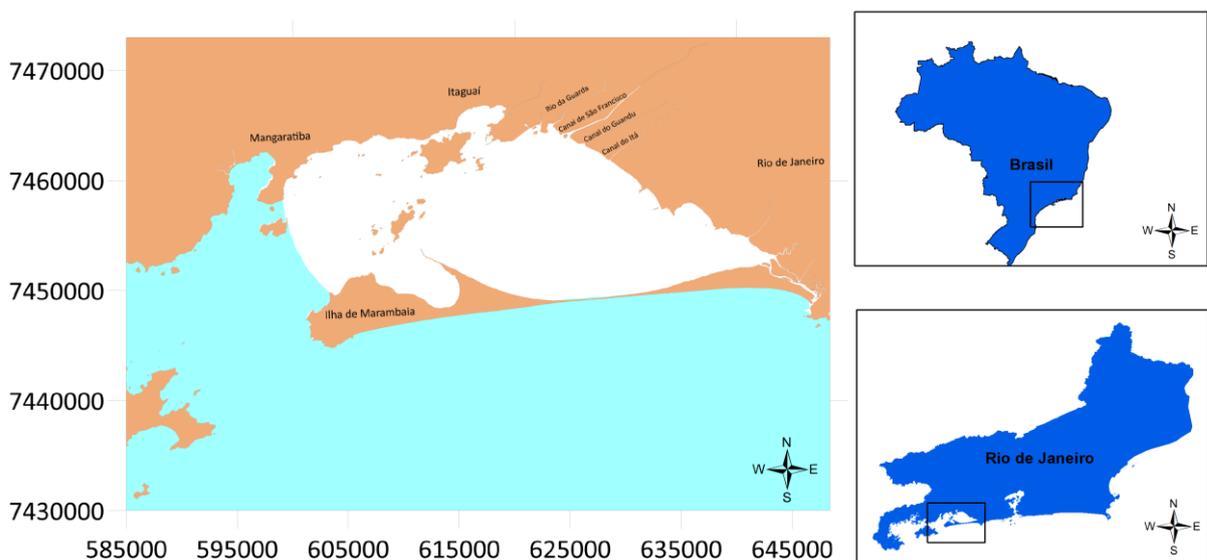
3.1 ÁREA DE ESTUDO

O estreitamento da entrada do mar na costa em um formato curvilíneo é chamado de baía. O Glossário dos Termos Genéricos dos Nomes Geográficos Utilizado no Mapeamento Sistemático do Brasil (IBGE, 2015) define baía como:

Reentrância da costa, porém, menor que a de um golfo, pela qual o mar penetra no interior das terras. A porção do mar que avança dentro dessa reentrância do litoral é menor que a verificada nos golfos, e, além do mais, existe um estreitamento na entrada da baía.

A baía de Sepetiba está localizada no sudoeste do estado do Rio de Janeiro, à 30 km da capital, entre as longitudes 44°01' a 43°33'W e as latitudes 22°53' a 23°05' S (FILGO, 2015). Possui uma área de 500 km² e um formato de elipse com 20 km de largura e 40 km de comprimento (CUNHA *et al.*, 2001). A localização da baía de Sepetiba está representada na FIGURA 1.

FIGURA 1 - LOCALIZAÇÃO DA BAÍA DE SEPETIBA



FONTE: O Autor (2021)

Segundo SEMADS (2001), o clima da região, influenciado pela cobertura vegetal e topografia da bacia de contribuição, é classificado como tropical úmido, com invernos secos e verões quentes. A precipitação média anual varia entre 1.400 e 2.500 mm, com o período de máxima precipitação no verão e a mínima no inverno.

Os ventos são predominantes dos quadrantes Sul e Oeste-Sudoeste e como segunda predominância, Norte-Nordeste e Este-Nordeste. A velocidade do vento varia entre 1,5 e 5,0 m/s; estes dados foram obtidos na estação meteorológica da Base Aérea de Santa Cruz, entre 1981 a 1989.

A circulação da baía é fortemente influenciada pela maré. A onda de maré é do tipo estacionária e o tempo de residência da água na baía é pequeno ($\approx 4,17$ dias), com expressiva mistura da coluna de água (SEMADS, 2001). O regime da maré é semi-diurno com desigualdade diurna, com amplitude na maré na sizígia de 1,1 m e 0,3 m na quadratura (micromarés). (DHN,1986 apud VILLENA *et al.*, 2012).

De acordo com a SEMADS (2001), as correntes de maré e os aportes fluviais do canal de São Francisco influenciam na distribuição da salinidade ao longo da baía. De maneira geral, a salinidade da baía varia entre 34 ups e 20 ups; na região interna é inferior a 20 ups e, na parte central, varia entre 30 ups e 34 ups.

O aporte de sedimentos vem principalmente de rios, que apresentam pouca mata ciliar e bacias com muita industrialização, com predominância de silte e argila, com granulometria fina (FEEMA, 1998 apud JORDÃO, 2017).

A região da baía de Sepetiba possui grande biodiversidade, com abrigo de peixes, mamíferos e crustáceos, graças a sua restinga, os cordões arenosos, costões rochosos e muitos quilômetros de manguezais (MOLISANI *et al.*, 2004 apud FILHO, 2015). Porém, a maior parte da vegetação primária das bacias ao entorno da baía encontra-se alterada por campos e pastagens (SONDOTECNICA, 2006 apud JORDÃO, 2017).

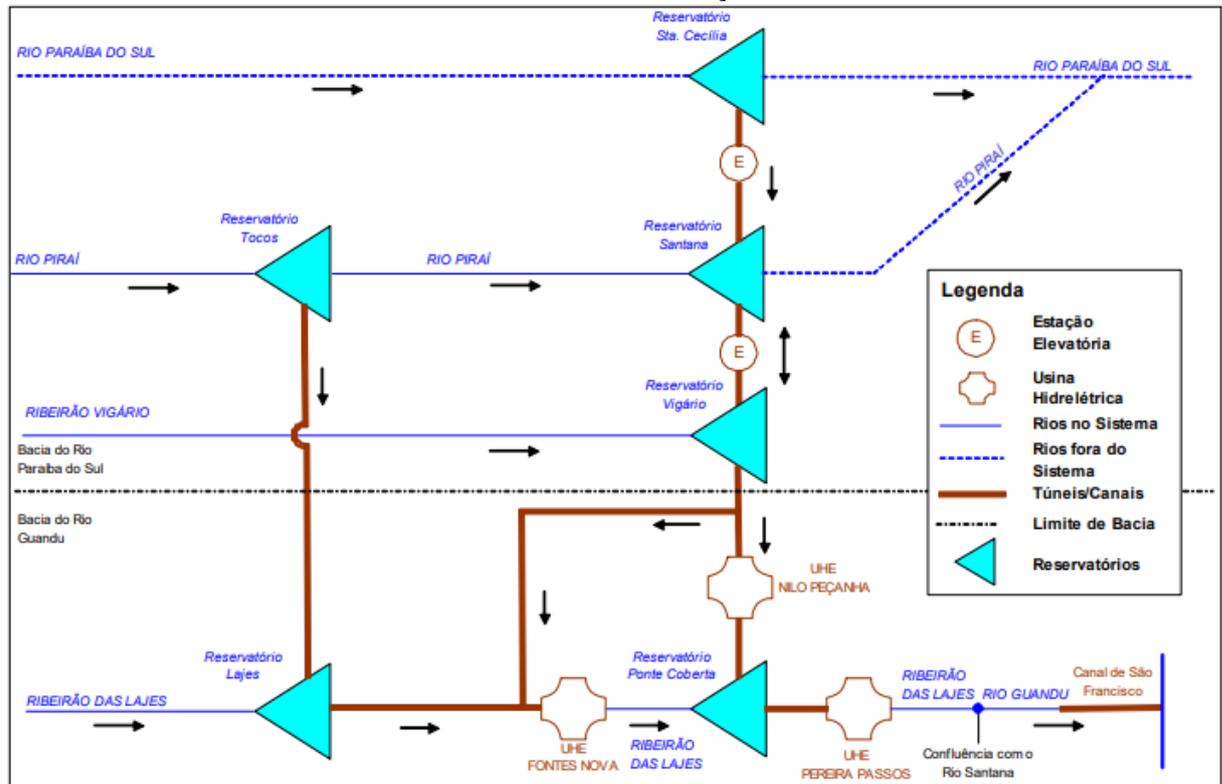
A bacia de drenagem da baía de Sepetiba possui aproximadamente 2.654 km², com grande contribuição do rio da Guarda, Canal do Guandu e Canal de São Francisco, sendo o último responsável por 86% do aporte fluvial (LACERDA *et al.*, 2007 apud FILHO, 2015). Os municípios contidos na bacia de drenagem são: Barra do Piraí, Engenheiro Paulo de Frontin, Itaguaí, Japeri, Mangaratiba, Mendes, Miguel Pereira, Nova Iguaçu, Paracambi, Piraí, Queimados, Rio Claro, Rio de Janeiro, Seropédica e Vassouras, com uma população estimada de 7.851.139 habitantes (IBGE, 2010, apud FILHO, 2015).

Devido a sua localização no eixo Rio de Janeiro – São Paulo, área economicamente estratégica, diversos empreendimentos se instalaram na região, como: portos, indústrias mineradoras, companhias siderúrgicas, petrolíferas, entre outros. A bacia do rio Guandu possui grande atividade agropecuária e industrial que

captam água e lançam efluentes ao longo do rio, e são de grande importância para a economia do Estado do Rio de Janeiro (PEREIRA, 2006)

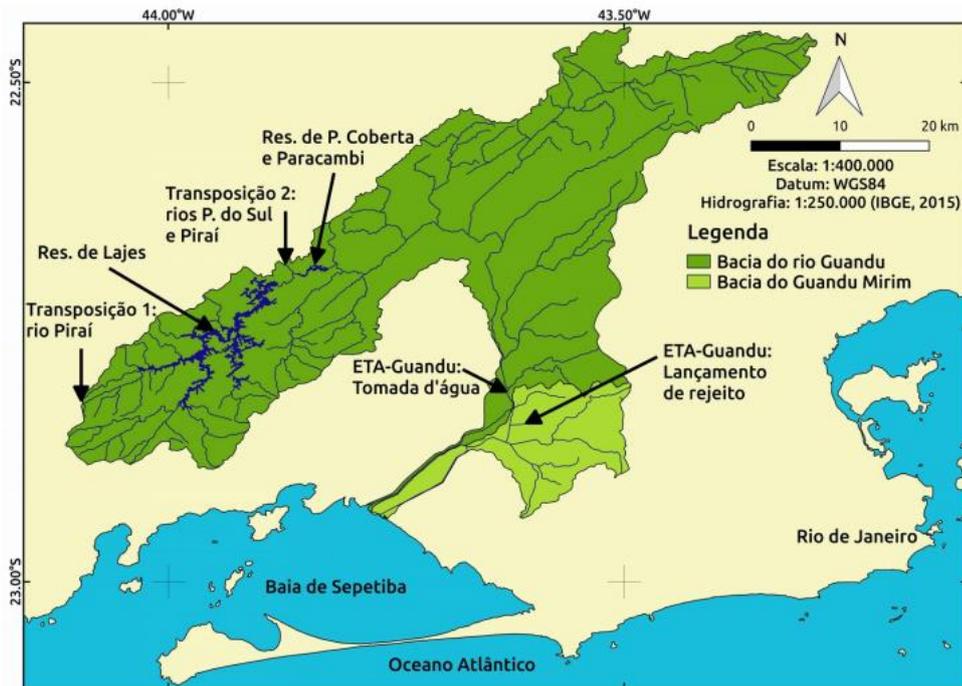
Pela proximidade com a capital do estado, o rio Guandu é uma ótima opção de captação para o abastecimento de água; porém, originalmente, possuía uma vazão pequena, que inviabilizava essa alternativa. Segundo Companhia de Estadual de Águas e Esgotos (CEDAE, 2021), a transposição do rio Guandu inicia em Barra do Piraí, no rio Paraíba do Sul, onde foi construída a barragem Santa Cecilia; à montante dessa barragem, foi construída uma estação elevatória que bombeia água para o rio Piraí, que possui mais uma barragem que inverte o fluxo do rio. As águas oriundas dos dois rios são bombeadas ao reservatório do Vigário, onde ocorre a geração de energia por gravidade; posteriormente, as águas fluem para outro reservatório, chamado Ponte Coberta, encontrando o ribeirão das Lajes e passando por uma nova usina hidrelétrica (UHE Pereira Passos). A partir desse ponto, ao se juntar com o rio Santana, passa a se chamar rio Guandu (CEDAE, 2021). A FIGURA 2 mostra o esquema da transposição das águas entre a bacia do rio Paraíba do Sul e a bacia do rio Guandu.

FIGURA 2 – DIAGRAMA UNIFILAR DAS TRANSPOSIÇÕES NA BACIA DO RIO GUANDU

FONTE: CARVALHO *et al.* (2007)

A bacia hidrográfica do rio Guandu drena 1921 km², abrangendo 12 municípios: Itaguaí, Nova Iguaçu, Seropédica, Piraí, Engenheiro Paulo de Frontin, Vassouras, Miguel Pereira, Rio Claro, Rio de Janeiro, Queimados, Japeri e Paracambi (PEREIRA, 2006). A FIGURA 3 mostra a bacia do rio Guandu até seu desague na baía de Sepetiba.

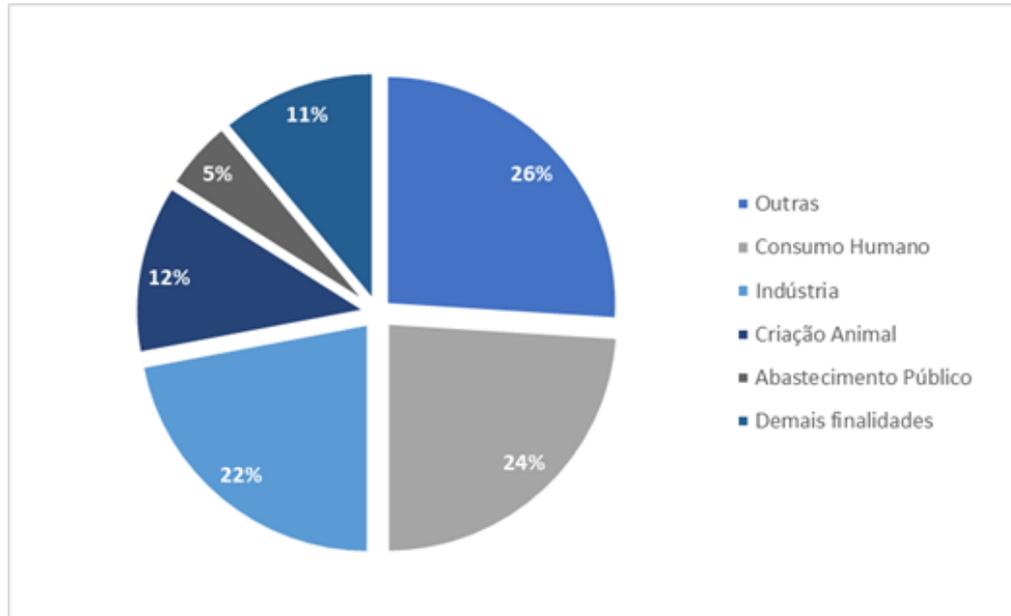
FIGURA 3 - BACIA DO RIO GUANDU E GUANDU MIRIM



FONTE: JORDÃO *et al.* (2018)

Segundo a Resolução do Comitê Guandu nº 107/14, o rio Guandu é classificado como classe 2. O principal uso das águas é para abastecimento da população metropolitana do Rio de Janeiro e suas águas devem atender os parâmetros de qualidade de água da legislação CONAMA 357/2005. Existem 523 pontos de captação na Região Hidrográfica Guandu. A distribuição dos pontos de captação por uso está apresentada na FIGURA 4, com o abastecimento de água representando o maior número de pontos cadastrados (COMITÊ GUANDU, 2021).

FIGURA 4 - DISTRIBUIÇÃO DAS ATIVIDADES QUE POSSUEM OUTORGA NA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO GUANDU



FONTE: COMITÊ GUANDU (2021) adaptado o Autor (2021)

O principal deságue do rio Guandu é o canal de São Francisco, criado em 1730, por jesuítas especializados em obras hidráulicas. Na época de cheia, as águas do rio Guandu inundavam as pastagens, sendo necessária a construção de uma vala no rio Guandu, com 5 m de largura. Seu principal uso era de levar água aos animais dos pastos próximos. A Comissão de Dragagem de Santa Cruz (CDSC), criada em 1931, retificou o canal até a baía de Sepetiba para receber até 40 m³/s. Posteriormente, com a cheia de outros rios, foi construído diques ao longo da margem do canal de São Francisco, desviando o volume excedente e aumentando a capacidade para mais de 600 m³/s (GÓES, 1942 apud JORDÃO, 2017).

3.2 INTRUSÃO SALINA EM ESTUÁRIOS

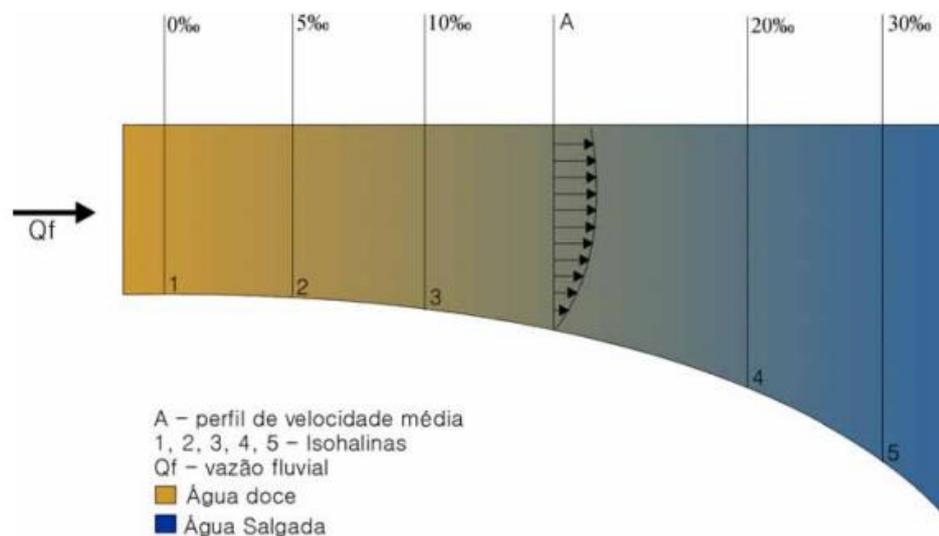
Segundo MIRANDA *et al.* (2002), o termo estuário é utilizado para descrever o encontro do rio com o mar. É um ecossistema bastante complexo e sofre ação de eventos climáticos, geológicos, hidrológicos, biológicos, oceanográficos e químicos. O volume de água doce que chega ao estuário varia de acordo com as características da vegetação, solo, condições climáticas, geologia, morfologia e ocupação urbana. Esses ambientes costeiros podem ser divididos em três partes: Zona de maré do rio (ZR) - parte do rio pertencente ao estuário, com salinidade quase

nula, que pode sofrer influência da maré, Zona de mistura (ZM) - é onde ocorre a mistura da água doce com a água do mar e Zona costeira (ZC) - localizada na entrada do estuário, é a transição da zona de mistura com a água oceânica.

Com o objetivo de estudar adequadamente os estuários, foram estabelecidos critérios de classificação de acordo com a geomorfologia, estratificação de salinidade, diagrama de estratificação-circulação, entre outros. Segundo PRITCHARD (1955) (apud MIRANDA *et al.*, 2002), é possível classificar os estuários em relação a estratificação de salinidade como:

- Estuários bem misturados: são formados geralmente em canais com baixa descarga fluvial, rasos e estreitos, que com a ação da maré moderada ou grande, produzirá turbulência que acabará com a haloclina, região com gradiente brusco (grande variação) de salinidade. Em ambientes naturais, existe pouca estratificação vertical, sendo mais observado o processo de mistura longitudinalmente, como mostrado na FIGURA 5.

FIGURA 5 - ESQUEMA DE UM ESTUÁRIO BEM MISTURADO

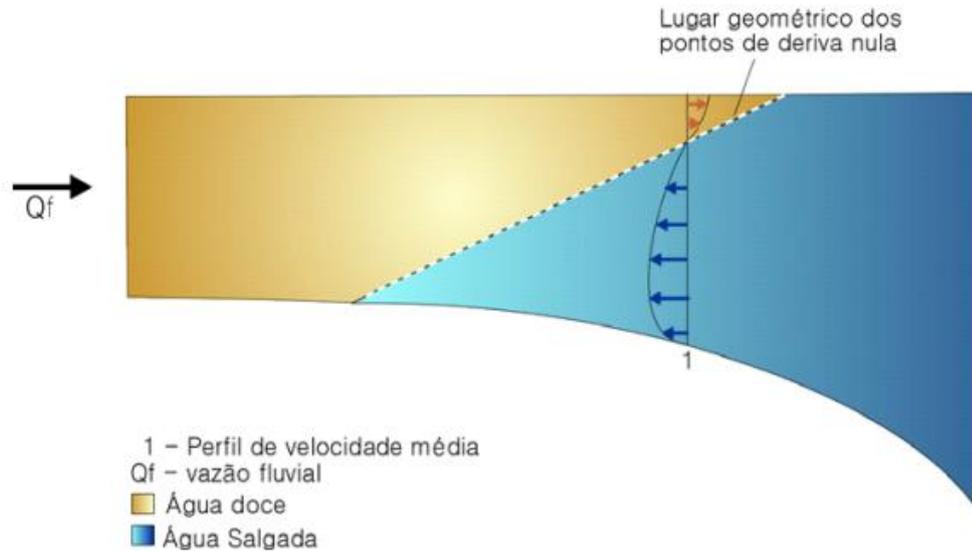


FONTE: AMARAL (2003)

- Estuários parcialmente misturados: possuem gradientes verticais moderados de salinidade, onde as águas internas do estuário sofrem agitação periódica por conta da alta energia de maré. Os vórtices turbulentos ocasionados pelo trabalho produzido entre o atrito e as forças estabilizadoras de empuxo, alteram os gradientes verticais de salinidade, aumentando superficialmente e

transportando água salgada para cima das camadas mais profundas, obtendo duas camadas com sentidos opostos, como pode ser observado na FIGURA 6.

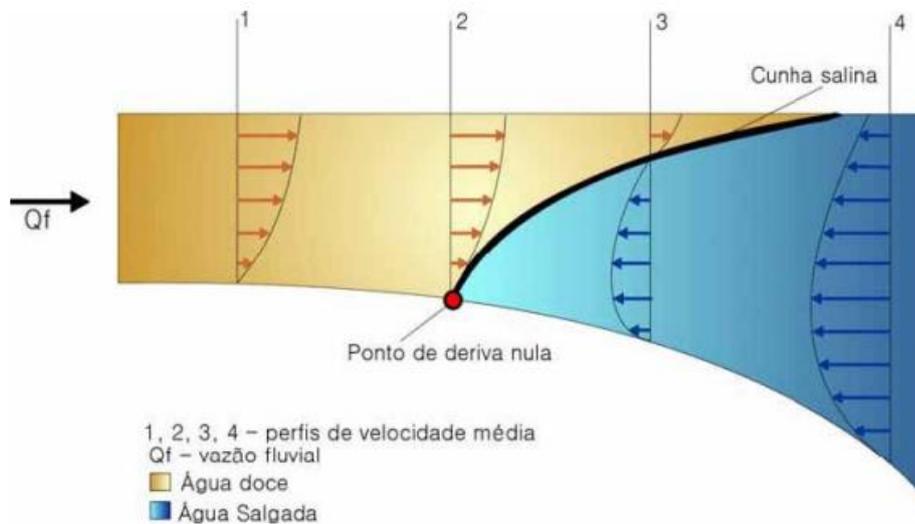
FIGURA 6 - ESQUEMA DE UM ESTUÁRIO PARCIALMENTE MISTURADO



FONTE: AMARAL (2003)

- Estuários tipo cunha salina: são típicos de regiões com alta vazão fluvial e com entranhamento, ocasionando aumento da salinidade na camada superficial e movimentação lenta da cunha até um estado de equilíbrio, como apresentado na FIGURA 7. A razão largura/profundidade é, em geral, grande e a razão de fluxo também, indicando que a circulação é regida pela descarga fluvial.

FIGURA 7 - ESQUEMA DE UM ESTUÁRIO TIPO CUNHA SALINA



FONTE: AMARAL (2003)

Segundo PEREIRA (2006), com as variações das amplitudes da maré e da diminuição das vazões fluviais, pode ocorrer invasão da água doce pela salina ou acontecer um represamento das águas do rio, que são sentidas por quilômetros de distâncias em rios com baixa declividade. Com o represamento da água, os empreendimentos não conseguem captar água doce e ocorre uma piora na qualidade das águas, pois os efluentes lançados ficam aprisionados.

De acordo com BLANTON (2004, apud BECKER *et al.*, 2010), as características da salinidade estuarina podem variar dependendo do período do ano, dos eventos de tempestade, da maré, da mudança de vazão dos rios, entre outros. BECKER *et al.* (2010) mostrou que o estuário do rio Cape Fear nos EUA, a salinidade e a circulação do estuário dependem principalmente da vazão de entrada do rio e das correntes de maré; a água do mar adentra quase 53 km a montante do rio.

Segundo o estudo de MINH *et al.* (2019), em estações de seca e de baixa vazão dos rios, as marés trazem água salgada para o interior do delta do rio Mecom, no Vietnã. Em 2015-2016, durante o evento do El Niño, a água do mar invadiu mais de 90 km para dentro do delta, provocando perdas nas safras de arroz e deixando a população sem acesso à água potável.

Eventos de seca afetam à disponibilidade hídrica de uma região, ocasionando problemas para usuários ao longo da bacia. Na estiagem de 2014-2015 que ocorreu na bacia do Guandu, a ETA Guandu teve que aumentar em 0,5 m a barragem, para

garantir água para abastecimento da região metropolitana do Rio de Janeiro. Com isso, ocorreu a diminuição da vazão no canal de São Francisco, permitindo uma maior penetração da intrusão salina e deixando algumas indústrias sem poder captar água, como foi o caso da Companhia Siderúrgica do Atlântico, que teve, em alguns momentos, parar de captar água (JORDÃO, 2017). A localização do Canal de São Francisco e dos pontos de captação (CSA, UTE, Distrito industrial e Gerdau) está apresentada na FIGURA 8; os pontos de captação lançamento estão diretamente ligados ao canal de São Francisco.

FIGURA 8 - CANAL DE SÃO FRANCISCO COM AS CAPTAÇÕES PRÓXIMAS A EMBOCADURA



FONTE: A Autora (2021)

Os dados existentes do Canal de São Francisco indicam que possui significativa estratificação vertical, com a maré adentrando no canal, formando estuário do tipo cunha salina (PEREIRA, 2006). O principal fator que regula a vazão do canal é a descarga da UHE de Pereira Passos, variando a intrusão da cunha salina com a operação da usina. Como a profundidade do canal é pequena, não ultrapassando 5 m de profundidade, fica difícil estudá-lo na vertical, sendo mais recomendado o uso de modelos hidrodinâmicos bidimensionais. Na região do rio

Quando até o canal de São Francisco é onde se concentram muitos pontos de captação outorgados e ocorrem grandes conflitos pela água. Isso porque a cunha salina possui grande alcance, prejudicando os usuários, que começam não captar mais água doce. (PEREIRA, 2006). Neste trabalho será apresentado o alcance da intrusão salina e não a estrutura vertical, por isso será utilizado o modelo 2DH.

3.3 MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS

3.3.1 MODELOS NUMÉRICOS

Os modelos são ferramentas indispensáveis para estudos e projetos de recursos hídricos, pois integram informações existentes e são capazes de interpolar e extrapolar dados de regiões onde não se há informações. Seu principal uso é para prever e avaliar alterações nos balanços de quantidades de movimento, que geram variações em níveis de água e correntes, e avaliar o transporte de substâncias que geram alteração nos constituintes das águas e sua qualidade. Devido às complexidades dos ambientes aquáticos, principalmente lagos, reservatórios e regiões costeiras, o uso de modelos se faz necessário. Os modelos integram processos complexos, de maneira que ocorra a interpolação e extrapolação de dados no tempo e espaço, sendo possível prever situações e cenários diferentes. Uma vez que o modelo for calibrado, ele é capaz de reproduzir a realidade (ROSMAN, 2021).

Existem diversos modelos numéricos que podem ser aplicados em ambientes aquáticos. Um deles é o SisBaHiA[®] - Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental, um sistema de modelos computacionais para estudos e projetos em uma vasta gama de corpos de água naturais.

Diversos estudos vêm sendo realizado por meio da modelagem computacional para o estudo da intrusão salina em estuários. AMARAL (2003), utilizou o SisBaHiA[®] para estudar a zona estuarina da bacia do rio Macaé, com o objetivo de descrever padrões da intrusão salina, concluindo que a diminuição da descarga fluvial aumenta o avanço da cunha salina no estuário, aumentando ainda mais em caso de sizígia. Já ANDREWS *et al.* (2017), usando o modelo UnTRIM, avaliaram a intrusão salina anteriores as mudanças realizadas ao longo dos anos no estuário de São Francisco nos EUA, observando que a mudança na vazão foi mais importante para as mudanças de intrusão salina do que as variações de batimetria e

geometria do estuário. WANG *et al.* (2019) utilizaram um modelo numérico para estudar a variação sazonal da salinidade no estuário do rio Indus, no Paquistão, concluindo que os maiores alcances da intrusão salina ocorrem em períodos de seca, ou seja, de menor vazões fluviais.

3.3.2 MODELO HIDRODINÂMICO E EULERIANO¹

O SisBaHiA[®] pode realizar a modelagem tanto em águas fluviais, quanto em ambientes costeiros; as simulações computacionais deste estudo serão realizadas utilizando o modelo hidrodinâmico bidimensional e o modelo de transporte euleriano do SisBaHiA[®]. O modelo hidrodinâmico utiliza um esquema numérico implícito de segunda ordem para a discretização temporal e elementos finitos quadráticos para a discretização espacial. Os campos de vento e atrito do fundo variam dinamicamente no tempo e no espaço e a modelagem de turbulência multi-escala é baseada em Simulação de Grandes Vórtices (LES). O modelo de transporte de sal utiliza a mesma discretização espacial e o mesmo esquema para discretização temporal do modelo hidrodinâmico. Informações sobre o sistema podem ser obtidas em www.sisbahia.coppe.ufrj.br, com detalhadas informações sobre a formulação matemática e numérica de todos os modelos.

Para a circulação hidrodinâmica, é necessário o estabelecimento de condições de contornos para o campo de velocidades e para a elevação da superfície livre. A imposição da elevação da superfície livre é geralmente prescrita ao longo dos contornos abertos, que representam os limites do domínio, como por exemplo, a entrada de uma baía ou estuário, e não um contorno físico. A imposição de fluxos ou velocidades é usualmente associada a contornos terrestres, que são as margens e seções de rios ou canais que estão incluídos no domínio de modelagem.

Como o sal interfere na massa específica da água e conseqüentemente na circulação hidrodinâmica, é necessário realizar o acoplamento do modelo de transporte Euleriano ao hidrodinâmico. Nesse acoplamento, as simulações computacionais utilizam o modelo hidrodinâmico bidimensional e o modelo de transporte de sal, onde a massa específica varia a cada ponto devido a salinidade,

¹ Texto adaptado de ROSMAN (2021)

visto que a salinidade possui comportamento ativo em estuários estratificados (influem no movimento das águas)

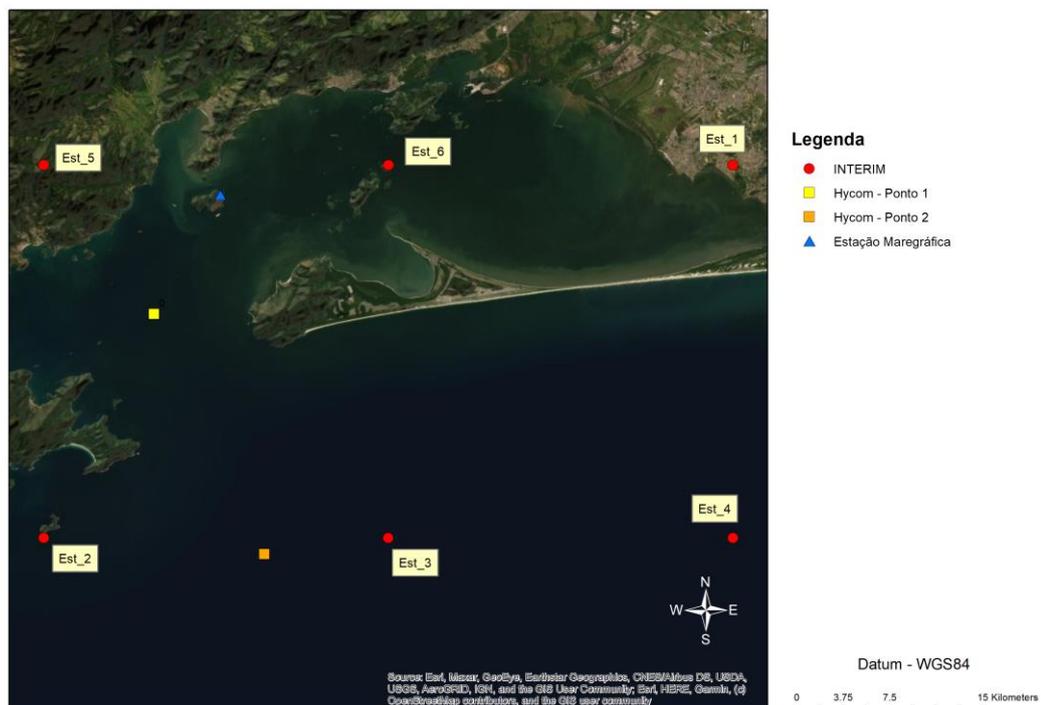
Na fronteira aberta, no caso de afluxo, valores de salinidade são prescritos, usando os valores obtidos pelo modelo oceanográfico HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model). Um dos objetivos do HYCOM é fornecer condições de contorno para modelos costeiros (WALLCRAFT *et al.*, 2009) – estão, a salinidade pode ser definida na fronteira aberta. O SisBAHiA[®] permite que os dados extraídos do HYCOM possam ser usados nas simulações. Na fronteira de terra, nos nós que correspondem aos rios, a salinidade será considerada nula. Os demais nós de contorno serão considerados impermeáveis, com fluxo normal nulo.

4 METODOLOGIA

Utilizando o sistema computacional SisBaHiA[®], foram realizadas simulações acopladas do Modelo Hidrodinâmico e do Modelo Euleriano de Transporte de Sal, para diferentes cenários de vazões do canal de São Francisco, para os meses de janeiro e julho, representativo do verão e inverno.

Os dados de vento, elevação, salinidade, maré e vazões, utilizados na modelagem, correspondem do ano de 2019. Os dados de salinidade e elevação foram obtidos através do HYCOM, para dois pontos na baía. Já a direção e intensidade do vento foram obtidas através da ferramenta computacional ERA-Interim (2021). A curva de maré foi definida na estação maregráfica Terminal Ilha Guaíba. A localização das estações do vento, maregráfica e dos pontos onde foram extraídos os dados do HYCOM estão demonstrados na FIGURA 9.

FIGURA 9 - LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE OBTENÇÃO DOS DADOS

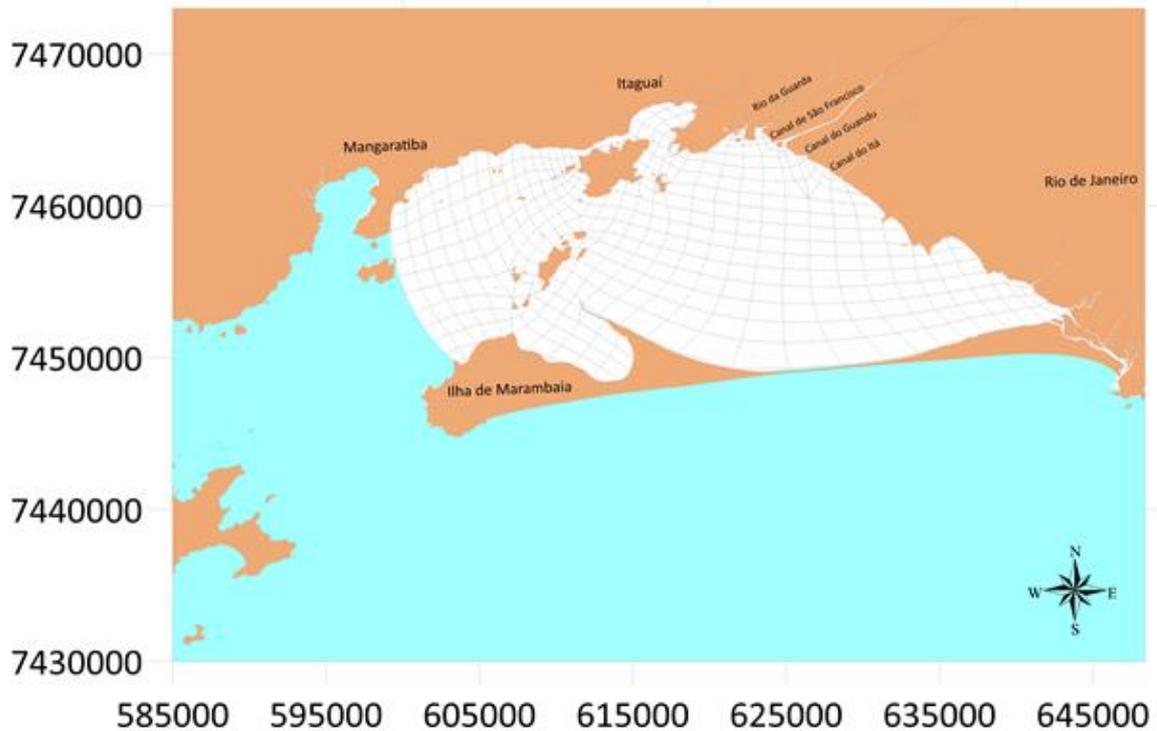


FONTE: A Autora (2021)

4.1 DOMÍNIO DE MODELAGEM

A malha, definida por CUNHA *et al.* (2001), foi ampliada na região do canal de São Francisco modificada, considerando o interesse em estudar a região, a fim de se observar o avanço da intrusão salina. A malha usada neste trabalho possui 504 elementos finitos quadrangulares com 2349 nós e pode ser visualizada na FIGURA 10

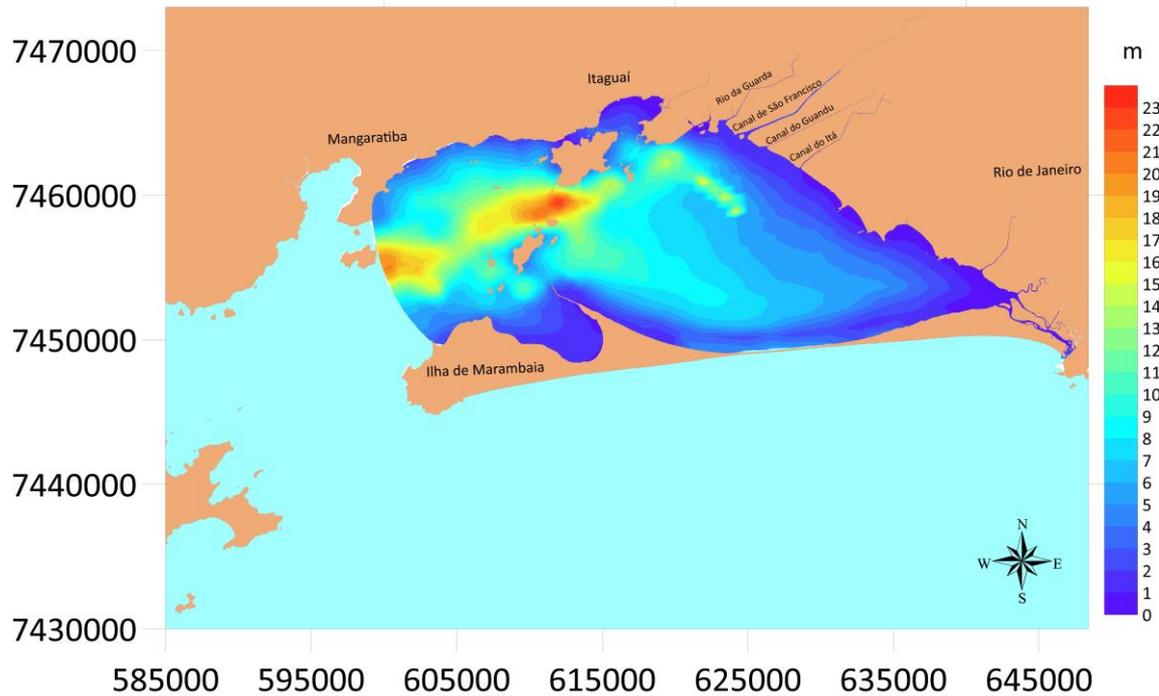
FIGURA 10 - MALHA E DOMÍNIO DE MODELAGEM DA BAÍA DE SEPETIBA.



FONTE: A Autora (2021)

A batimetria da baía de Sepetiba foi obtida em ROSMAN *et al.* (2018), com dados provenientes da carta náutica nº 1607 (escala 1:80.000) da Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil (DHN), e da carta náutica nº 1622, para a região no canal dragado, com dados atualizados entre 2015-2020, mostrada na FIGURA 11. É possível observar que as maiores profundidades são nas regiões da entrada e central da baía, sendo constantemente alterada devido a dragagem do canal central da baía. Grande parte da baía possui profundidade menor que 4 m, principalmente o fundo da baía, onde não ocorre dragagem e há acúmulo de sedimento.

FIGURA 11 - BATIMETRIA DA BAÍA DE SEPETIBA UTILIZADA NO DOMÍNIO DE MODELAGEM



FONTE: A Autora (2021)

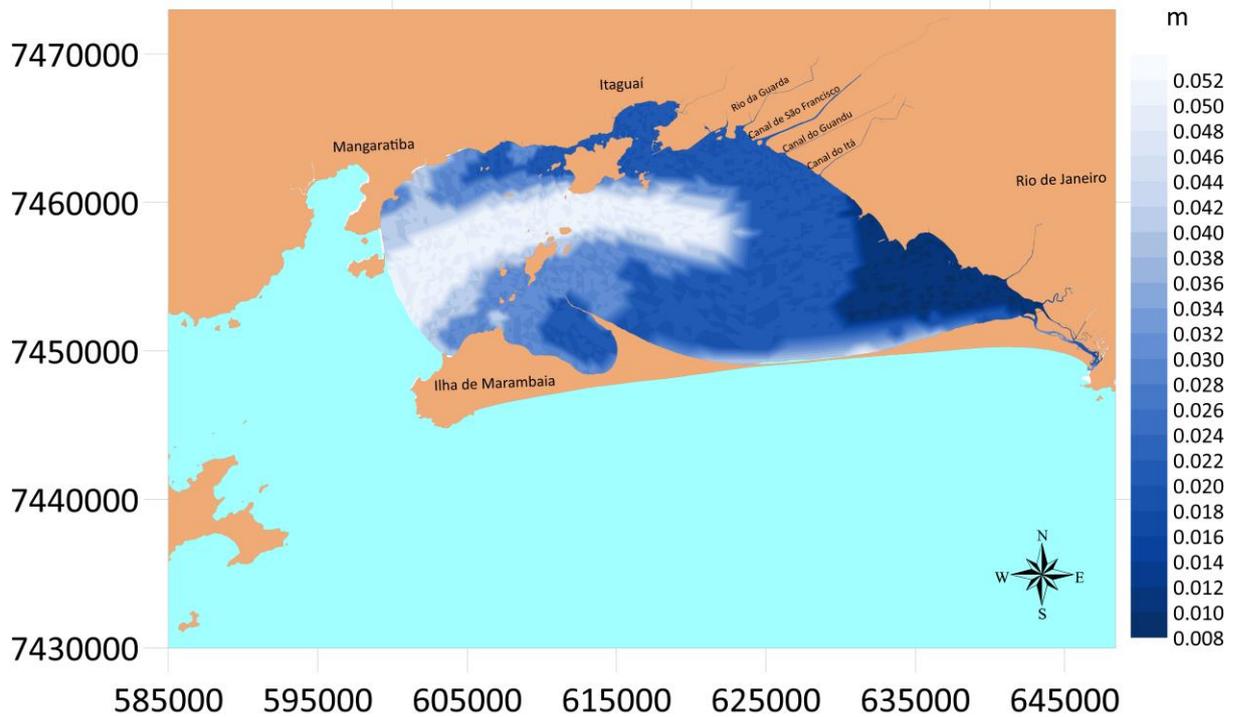
Em função da composição do sedimento no fundo da baía, é possível obter a tensão de atrito no fundo, que é dependente da amplitude de rugosidade equivalente do fundo. Os dados foram obtidos em ROSMAN *et al.* (2018), que definiu os valores a partir do tipo de sedimento (TABELA 1). As características do tipo de sedimento da área de estudo foram baseadas nos estudos de Belo (2001, apud ROSMAN, 2018) e Belo *et al.* (2002, apud ROSMAN, 2018). A distribuição espacial da amplitude de rugosidade equivalente do fundo da baía de Sepetiba é apresentada na FIGURA 12. Próximos a foz dos rios, o sedimento predominante é a argila; na região central é a areia fina e nas extremidades oeste até o centro da baía, onde ocorre a troca com água oceânica, a areia média/grossa é predominante.

TABELA 1 - VALORES SUGERIDOS PARA A AMPLITUDE EFETIVA DA RUGOSIDADE EQUIVALENTE DO FUNDO EM RELAÇÃO AO TIPO DE SEDIMENTO

Sedimentos	Amplitude de ϵ (m)
Predominância de siltes e finos	$0,0001 \text{ m} < \epsilon < 0,0010 \text{ m}$
Predominância de areais finas	$0,0070 \text{ m} < \epsilon < 0,0150 \text{ m}$
Predominância de areais médias	$0,0100 \text{ m} < \epsilon < 0,0300 \text{ m}$
Predominância de areias grossas	$0,0250 \text{ m} < \epsilon < 0,0500 \text{ m}$
Predominância de areais muito grossas	$0,0400 \text{ m} < \epsilon < 0,0800 \text{ m}$
Predominância de areais com cascalho	$0,0500 \text{ m} < \epsilon < 0,1200 \text{ m}$
Sedimentos com vegetação	$0,0500 \text{ m} < \epsilon < 0,1500 \text{ m}$
Sedimentos com obstáculos	$0,1500 \text{ m} < \epsilon < 0,400 \text{ m}$

FONTE ABBOTT & BASCO (1989) adaptado por ROSMAN (2021)

FIGURA 12 - AMPLITUDE DA RUGOSIDADE DE FUNDO UTILIZADO NO DOMÍNIO DE MODELAGEM DA BAÍA DE SEPETIBA



FONTE: A Autora (2021)

4.2 FORÇANTES HIDRODINÂMICOS

A maré, as vazões fluviais e os ventos são os forçantes necessários para a simulação da circulação hidrodinâmica. Os dados de vento e maré, que foram usados nas simulações, correspondem ao ano de 2019.

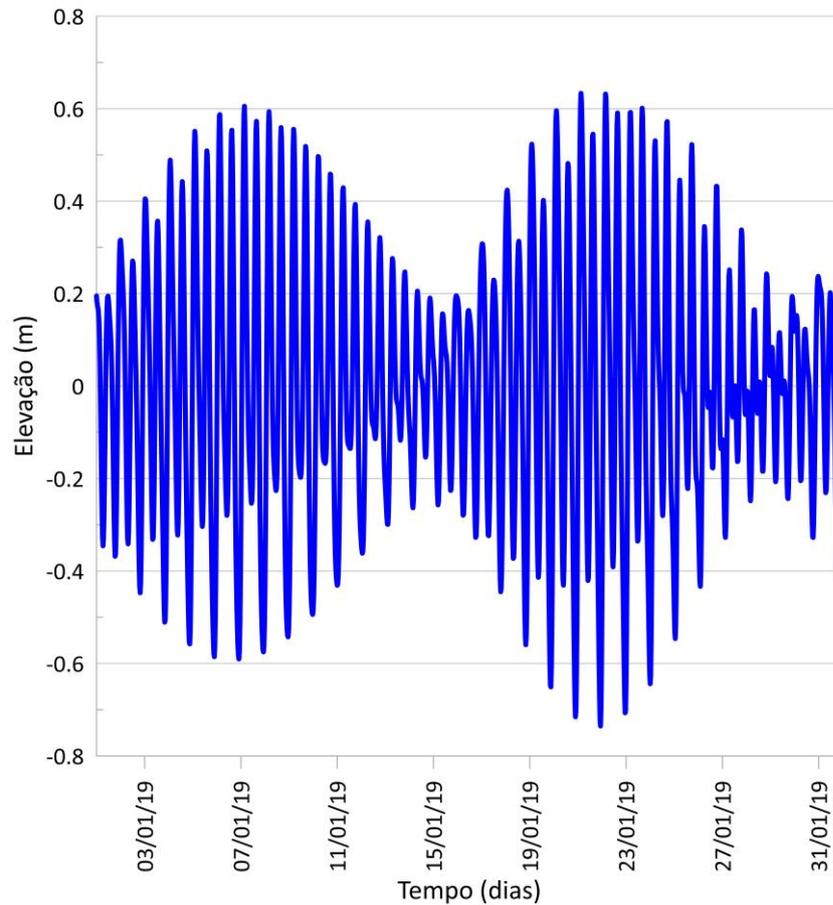
A curva de maré astronômica foi obtida a partir de constantes harmônicas definidas na estação maregráfica Terminal Ilha Guaíba ($23^{\circ}00' S$, $44^{\circ}01,9' W$), e apresentadas na TABELA 2. As curvas de maré foram definidas para os meses de janeiro e julho de 2019, verão e inverno, apresentadas nas FIGURAS 13 e 14, respectivamente. As alturas máximas da maré são, aproximadamente, 1,13 m na sizígia e 0,41 m na quadratura, em janeiro de 2019, e 1,14 m e 0,34 m na sizígia e quadratura, respectivamente, durante o mês de julho.

TABELA 2 - CONSTANTES HARMÔNICAS DA MARÉ

Constante	Período (seg)	Amplitude (m)	Fase (rad)
MS4	21972.02	0.034	3.335
M4	22357.08	0.077	1.682
MN4	22569.03	0.032	0.842
M3	29809.44	0.013	3.598
K2	43082.05	0.057	1.403
S2	43200.00	0.192	1.623
T2	43259.21	0.008	1.814
L2	43889.83	0.023	0.919
M2	44714.16	0.329	1.518
N2	45570.05	0.044	2.270
2N2	46459.35	0.017	2.219
K1	86164.09	0.059	2.541
P1	86637.20	0.021	2.367
O1	92949.63	0.111	1.537
Q1	96726.08	0.025	1.101

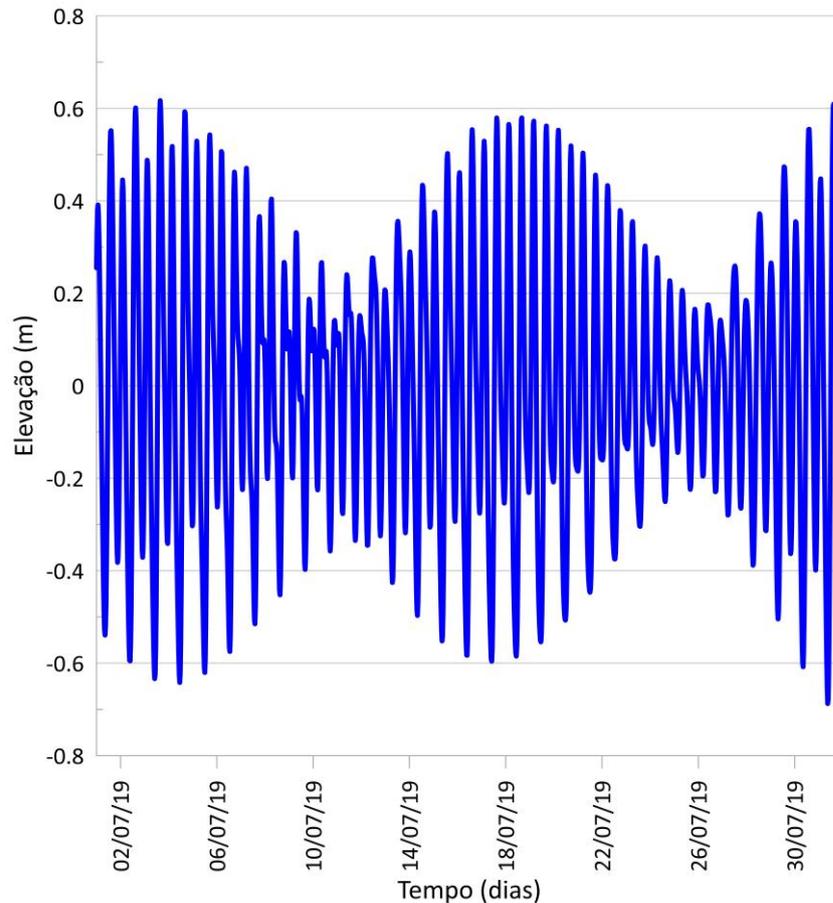
FONTE: SisBaHiA® (2021)

FIGURA 13 - CURVA DE MARÉ ASTRONÔMICA PARA O MÊS DE JANEIRO DE 2019, OBTIDA A PARTIR DAS CONSTANTES HARMÔNICAS PARA A ILHA GUAÍBA



FONTE: SisBaHiA® (2021)

FIGURA 14 - CURVA DE MARÉ ASTRONÔMICA PARA O MÊS DE JULHO DE 2019, OBTIDA A PARTIR DAS CONSTANTES HARMÔNICAS PARA A ILHA GUAÍBA



FONTE: SisBaHiA® (2021)

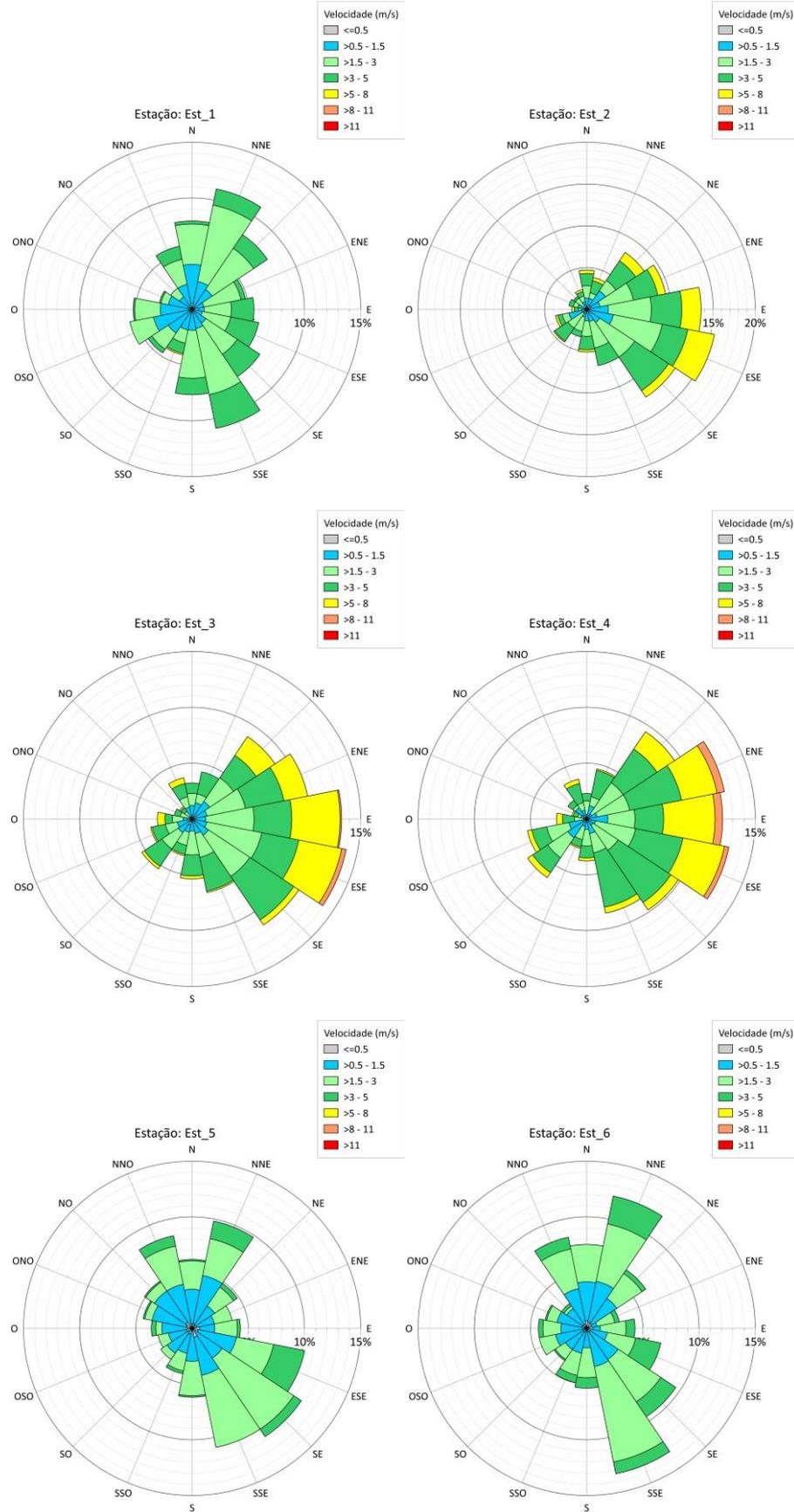
Os dados de vento do ano de 2019, obtidos junto ao ERA-Interim (2021), são considerados representativos da realidade (STÜKER *et al.*, 2016). Esse dados são obtidos através de uma reanálise atmosférica a partir de dados obtidos das estações meteorológicas. Foram usados valores horários de direção e intensidade do vento a em 6 estações: est_1 (22°58' S ,43°39' W), est_2 (23°13' S, 44°9' W), est_3 (23°13' S, 43°54' W), est_4 (23°13' S, 43°39' W), est_5 (22°58' S, 44°9' W) e est_6 (22°58' S, 43°54' W); a localização das estações é mostrada na FIGURA 9. As rosas de distribuição do vento nas duas estações estão representadas nas FIGURAS 15 e 16 para os meses de janeiro e julho, respectivamente, que são meses representativos para de verão e inverno.

Os ventos na região são predominantes nas direções NNE e SSE para os meses de verão, nas estações est_1, est_5 e est_6. As velocidades médias para as estações est_1, est_5 e est_6 são 2,06 m/s, 1,62 m/s e 1,83 m/s. Já para as

estações est_2, est_3 e est_4, em janeiro, as direções predominantes são ESE e E; as velocidades médias são 2,77 m/s, 3,11 m/s e 3,47 m/s, respectivamente.

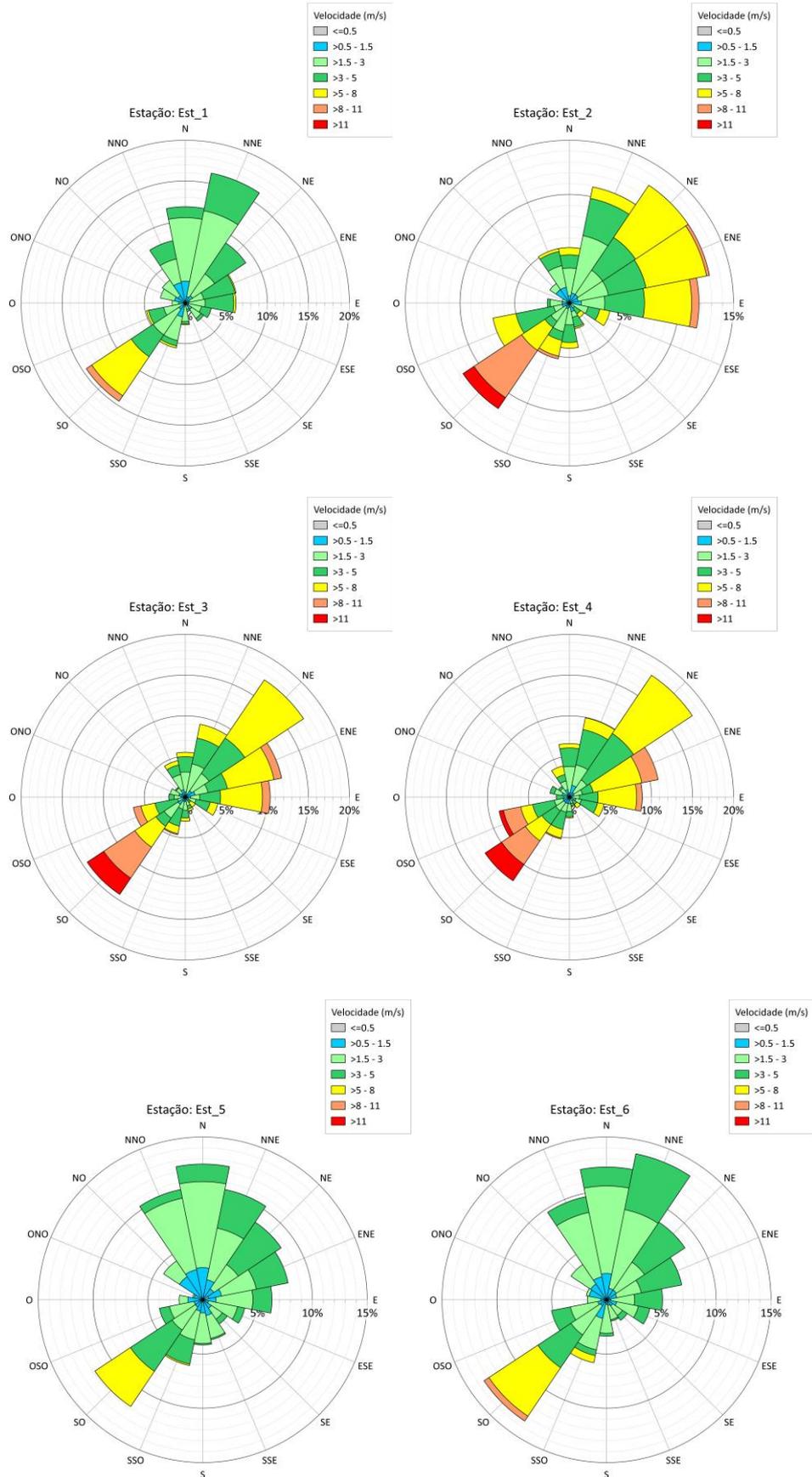
Para o mês de julho, existe a predominância nas direções NNE e SO para as estações est_1, est_5 e est_6, e NE e SO, para est_2, est_3 e est_4. As velocidades médias são maiores quando comparadas com o verão: 2,78 m/s, 4,22 m/s, 4,58 m/s, 4,71 m/s, 2,43 m/s e 2,68 m/s, para as estações est_1, est_2, est_3, est_4, est_5 e est_6, respectivamente.

FIGURA 15 – ROSAS DE DISTRIBUIÇÃO DOS VENTOS NAS ESTAÇÕES EM JANEIRO DE 2019



FONTE: INTERIM (2021)

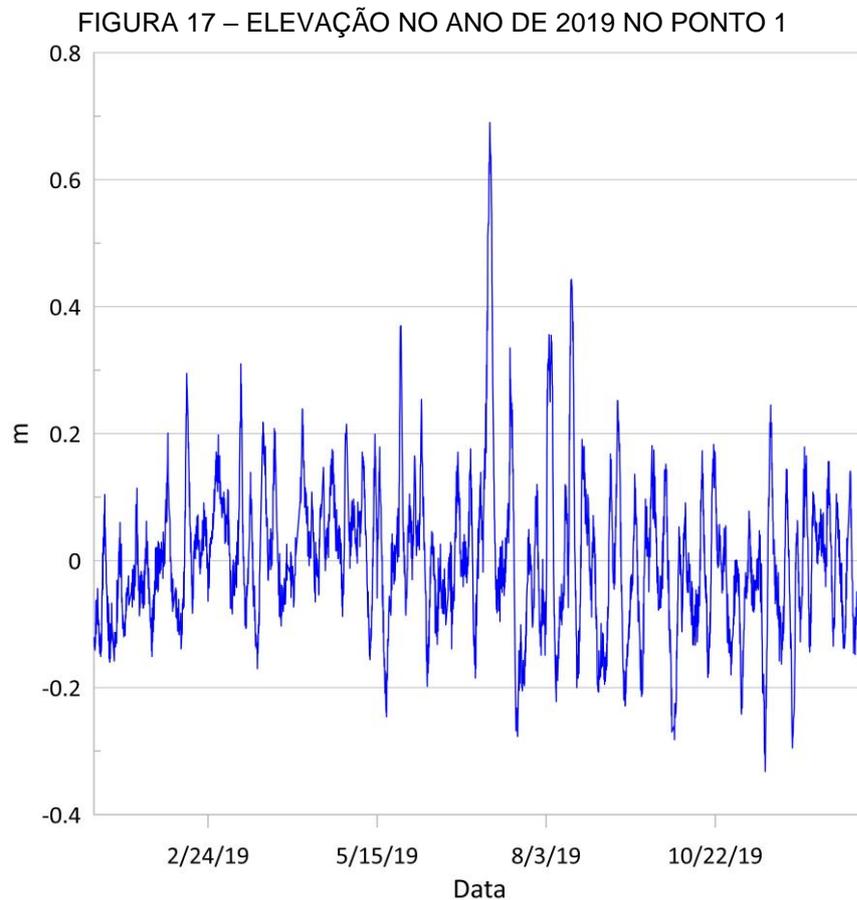
FIGURA 16 - ROSAS DE DISTRIBUIÇÃO DOS VENTOS NAS ESTAÇÕES EM JULHO DE 2019



FONTE: INTERIM (2021)

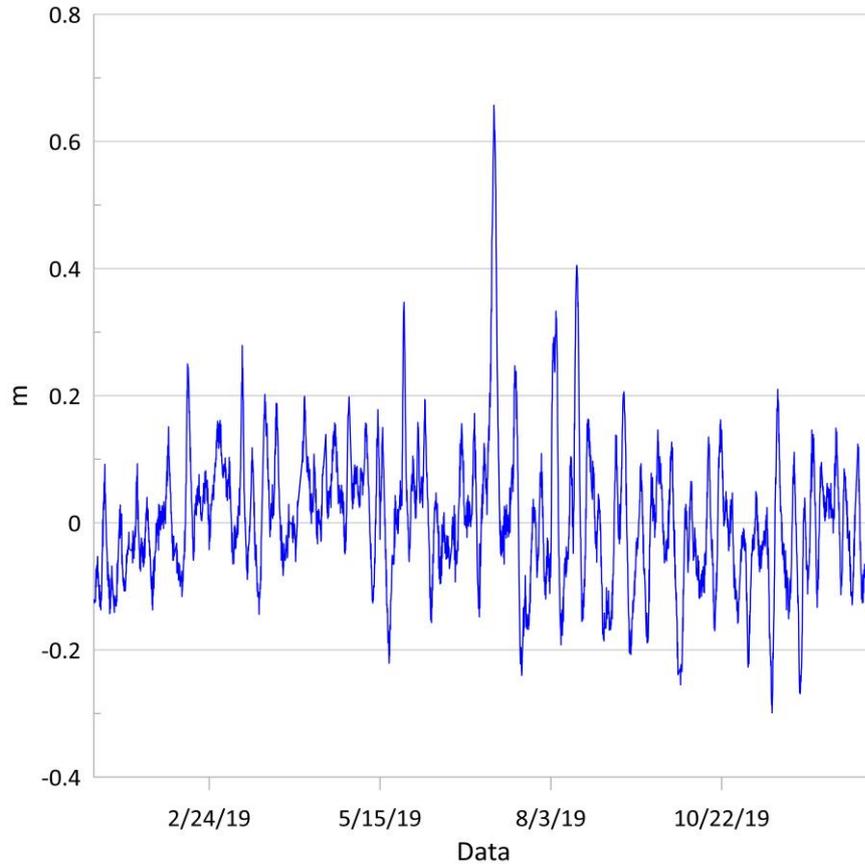
Os valores de elevação da superfície livre, que correspondem a maré meteorológica, e salinidade foram obtidos através do HYCOM, simulados para o ano de 2019, com valores extraídos a cada 3 horas. Dois pontos foram usados; o ponto 1, nas coordenadas 44°4.8' W 23°4,8' S e o ponto 2, nas coordenadas 44°0' W e 23°14,4' S. A localização dos pontos é mostrada na FIGURA 9.

A elevação da superfície livre está disposta na FIGURA 17 para o ponto 1 e na FIGURA 18, para o ponto 2. Comparando os dois pontos, não existe variação significativa entre os pontos, por isso apenas o ponto 1 foi utilizado na simulação. No meio do ano, entre os meses de julho a agosto, ocorrem os maiores valores de elevação da superfície livre. Em contra partida, entre dezembro e janeiro são encontrados os menores valores.



FONTE: HYCOM (2021)

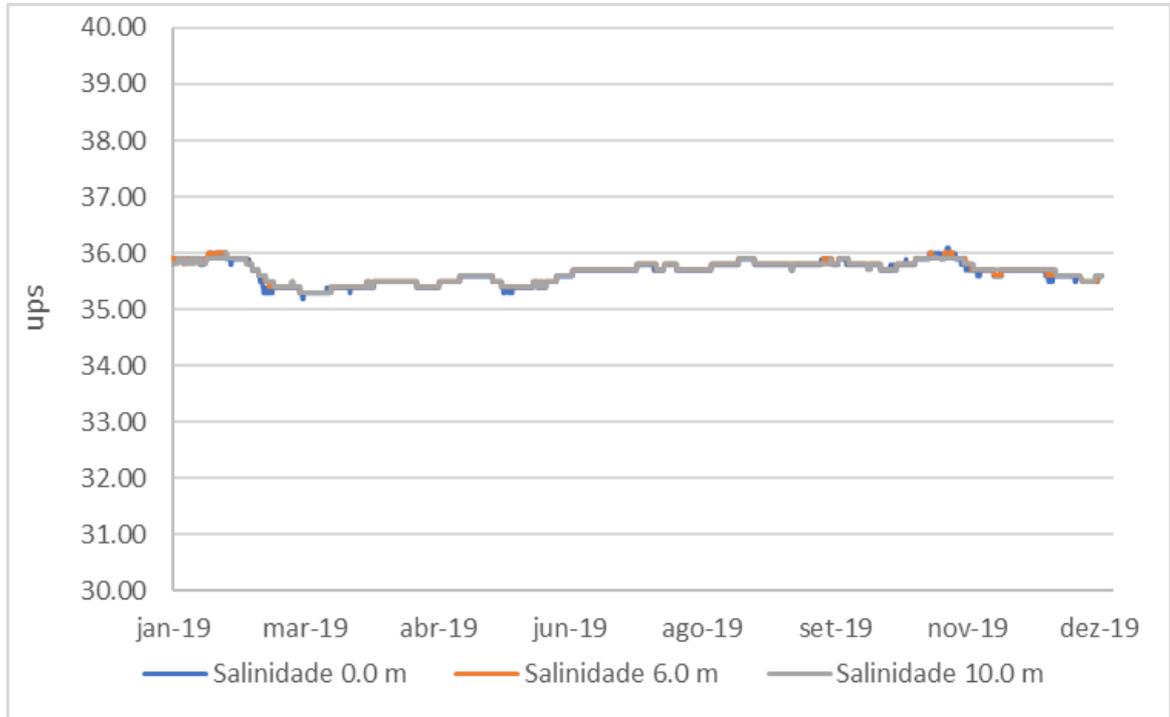
FIGURA 18 - ELEVAÇÃO NO ANO DE 2019 NO PONTO 2



FONTE: HYCOM (2021)

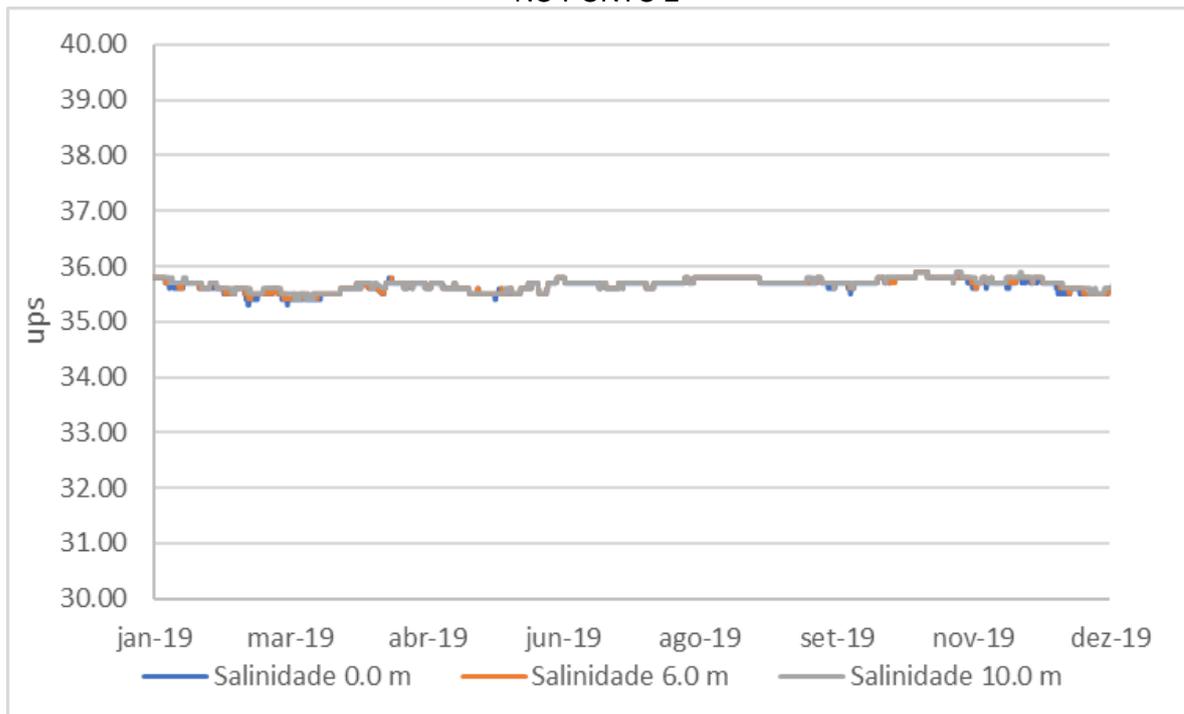
As FIGURAS 19 e 20 apresentam a salinidade para o ano de 2019 na superfície e nas profundidades 6,0 e 10,0 metros. A diferença entre os valores de salinidade entre os pontos 1 e 2 é insignificante (menor que 1%). Nos meses de janeiro e julho há pouca variação da concentração de sal, com valores próximos a 36,0 ups para janeiro e 35,9 ups para julho. Sendo assim, foram utilizados os mesmos valores para as duas simulações, 36,0 ups.

FIGURA 19 - SALINIDADE AO LONGO DO ANO DE 2019 PARA DIFERENTES PROFUNDIDADES NO PONTO 1



FONTE: HYCOM (2021)

FIGURA 20 - SALINIDADE AO LONGO DO ANO DE 2019 PARA DIFERENTES PROFUNDIDADES NO PONTO 2



FONTE: HYCOM (2021)

As vazões utilizadas nas simulações foram retiradas do Relatório Executivo do Plano Estratégico de Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas do rio Guandu, da Guarda e Guandu Mirim (COMITÊ GUANDU, 2018). A disponibilidade hídrica da bacia foi calculada considerando dados de precipitação de 1977 a 2006 e as infraestruturas que alteraram o regime natural das vazões. As vazões de $Q_{7,10}$ e $Q_{\text{méd}}$ estão dispostas na TABELA 3. Os valores de $Q_{7,10}$ representam a vazão mínima de 7 dias de duração, com 10 anos de ocorrência. Já os valores da $Q_{\text{méd}}$ são os valores médios das vazões de longo prazo. As maiores vazões encontram-se no rio Guandu, que posteriormente é chamado de Canal de São Francisco.

TABELA 3 - VAZÕES $Q_{\text{méd}}$ E $Q_{7,10}$ DA BACIA DO GUANDU

Trecho	$Q_{\text{méd}}$ (m ³ /s)	$Q_{7,10}$ (m ³ /s)
Rio Guandu	188,6	129,3
Canal de São Francisco	136,48	124,77
Rio da Guarda	5,54	1,30
Rio Mazomba	2,62	0,51
Rio Guarda Mirim	3,24	0,73
Canal do Itá	1,4	0,37

FONTE: COMITÊ GUANDU (2018) adaptado pelo Autor (2021)

4.3 CENÁRIOS

Foram realizadas simulações para diferentes cenários, variando o vento, a maré (astronômica e meteorológica) e as vazões do Canal de São Francisco. As vazões dos demais rios permaneceram inalteradas. Os cenários são apresentados abaixo:

- Cenário 1: Utilizados dados de vento e a curva de maré para janeiro de 2019, correspondendo ao verão, e vazões $Q_{\text{méd}}$ no canal de São Francisco e nos demais rios;
- Cenário 2: Utilizados dados de vento e a curva de maré para julho de 2019, correspondendo ao inverno, e vazões $Q_{\text{méd}}$ no canal de São Francisco e nos demais rios;
- Cenário 3: Utilizados dados de vento e a curva de maré para janeiro de 2019, correspondendo ao verão, e vazões $Q_{7,10}$ no canal de São Francisco e nos demais rios;

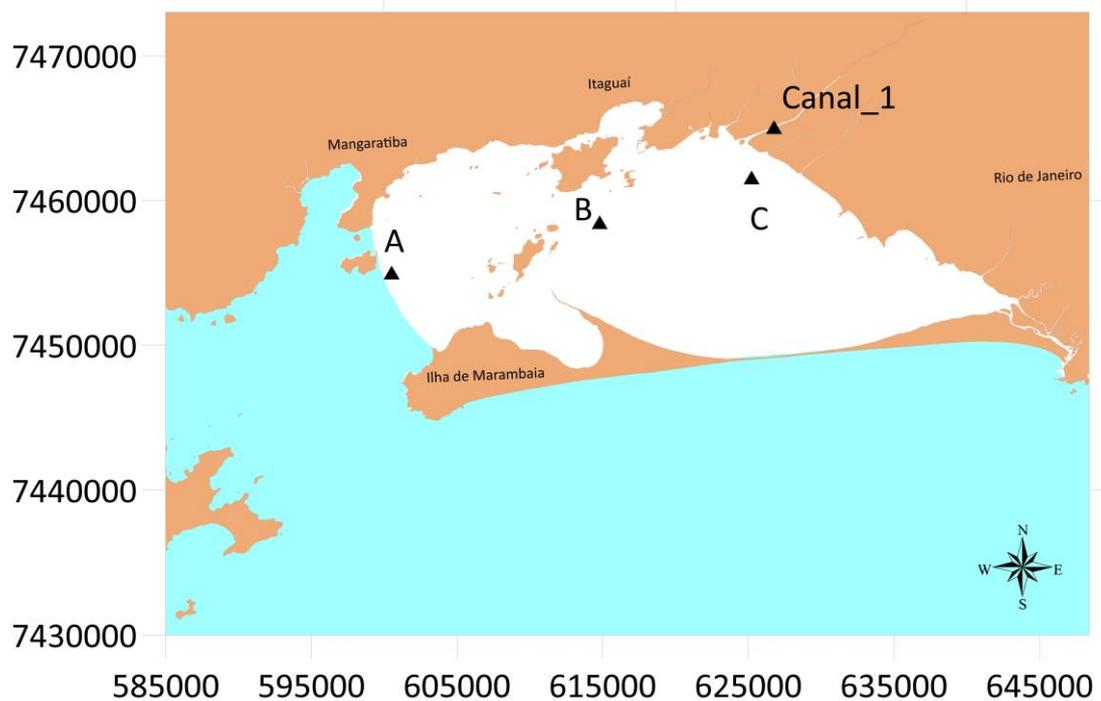
- Cenário 4: Utilizados dados de vento e a curva de maré para julho de 2019, correspondendo ao inverno, e vazões $Q_{7,10}$ no canal de São Francisco e nos demais rios.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos através das simulações do modelo hidrodinâmico acoplado ao modelo de transporte de sal do SisBaHiA® para os diferentes cenários.

O modelo de transporte de sal teve um aquecimento de 10 dias para garantir que as condições iniciais não interfiram nos resultados finais. Algumas estações foram definidas dentro da Baía de Sepetiba a fim de se analisar a propagação da curva de maré, a evolução temporal das velocidades e da salinidade na baía e no canal de São Francisco. A FIGURA 21 mostra a localização dessas estações dispostas ao longo da baía de Sepetiba e na entrada do canal de São Francisco.

FIGURA 21 - LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES A, B, C E CANAL_1 NA BAÍA DE SEPETIBA



FONTE: A Autora (2021)

5.1 CENÁRIO VERÃO

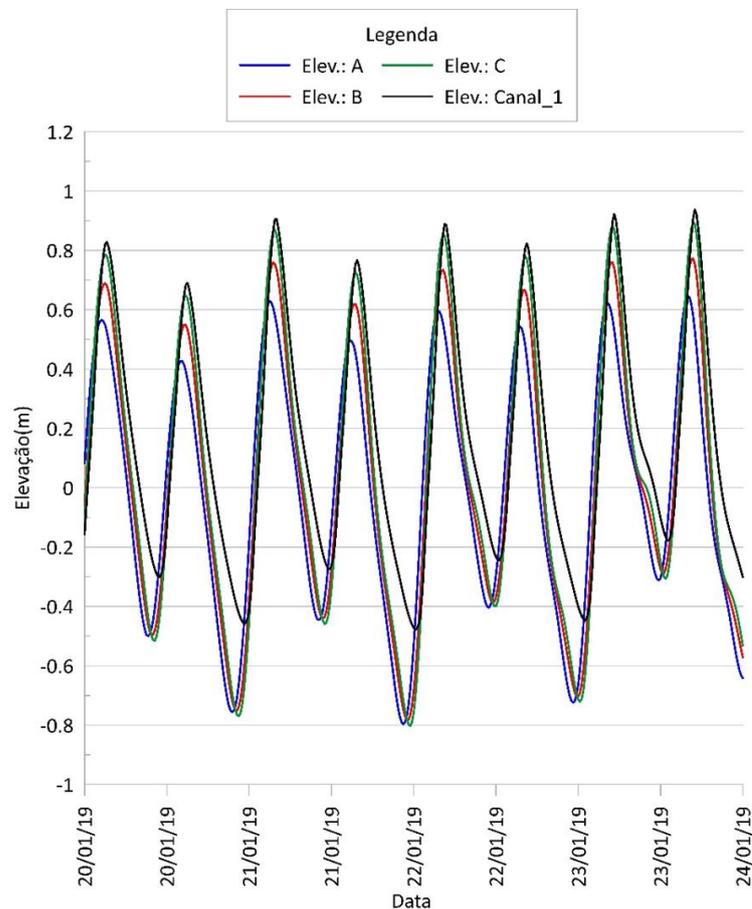
5.1.1 CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA

A circulação hidrodinâmica dentro da baía, considerando os dois cenários, quando as vazões do canal de São Francisco variam ($Q_{méd}$ e $Q_{7,10}$) não apresentou variações significativas. Na região próxima a embocadura do canal de São Francisco

ocorreu variações no campo de velocidades, quando os dois cenários são comparados. Por isso, na análise da circulação hidrodinâmica da baía, apenas os resultados referentes a vazão $Q_{\text{méd}}$ são apresentados.

A FIGURA 22 mostra a propagação da onda de maré para o cenário de vazão $Q_{\text{méd}}$. É possível observar que a onda, ao entrar no interior da baía, sofre uma amplificação; essa amplificação é provocada pela variação da batimetria da baía. Observa-se também um atraso nas preamares de cerca de 1,5 horas, entre a entrada da baía (estação A) e a entrada do canal (Canal_1).

FIGURA 22 - ELEVÇÃO NAS ESTACÕES A, B, C E CANAL_1 ENTRE 20/01/2019 E 24/01/2019 PARA O CENÁRIO DE $Q_{\text{MÉD}}$

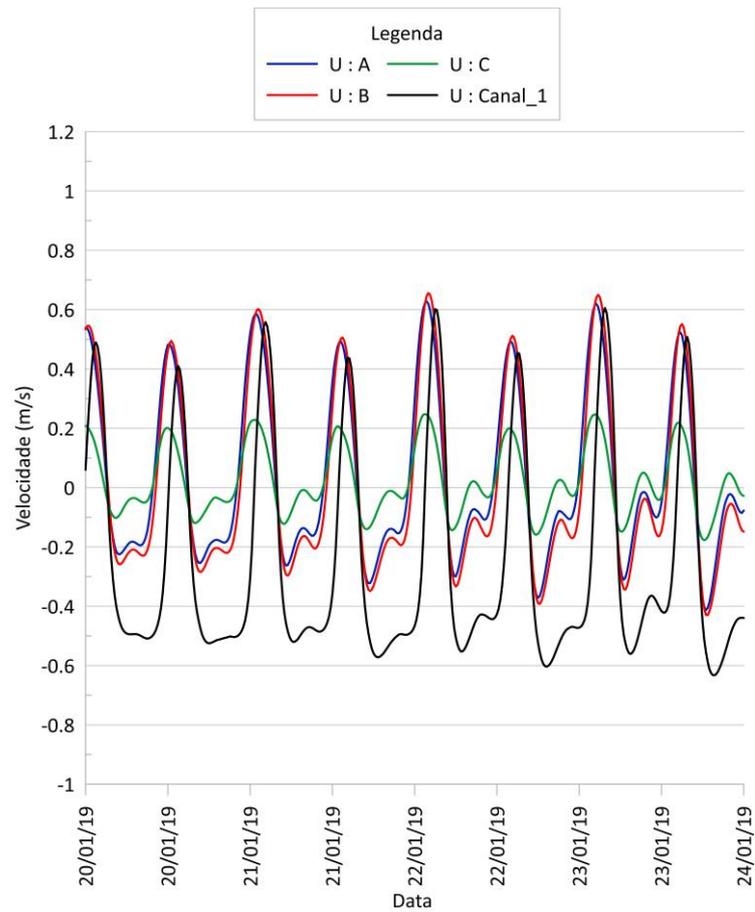


FONTE: A Autora (2021)

Nas FIGURAS 23 e 24 estão dispostas as componentes Leste-Oeste e Norte-Sul das velocidades, respectivamente, entre 20/01/2019 e 24/01/20219, no período de sizígia, quando os valores das componentes das velocidades são significativamente maiores. Na estação A é onde ocorrem as menores velocidades, devido a maior profundidade. Já no ponto mais interno, na estação Canal_1, são

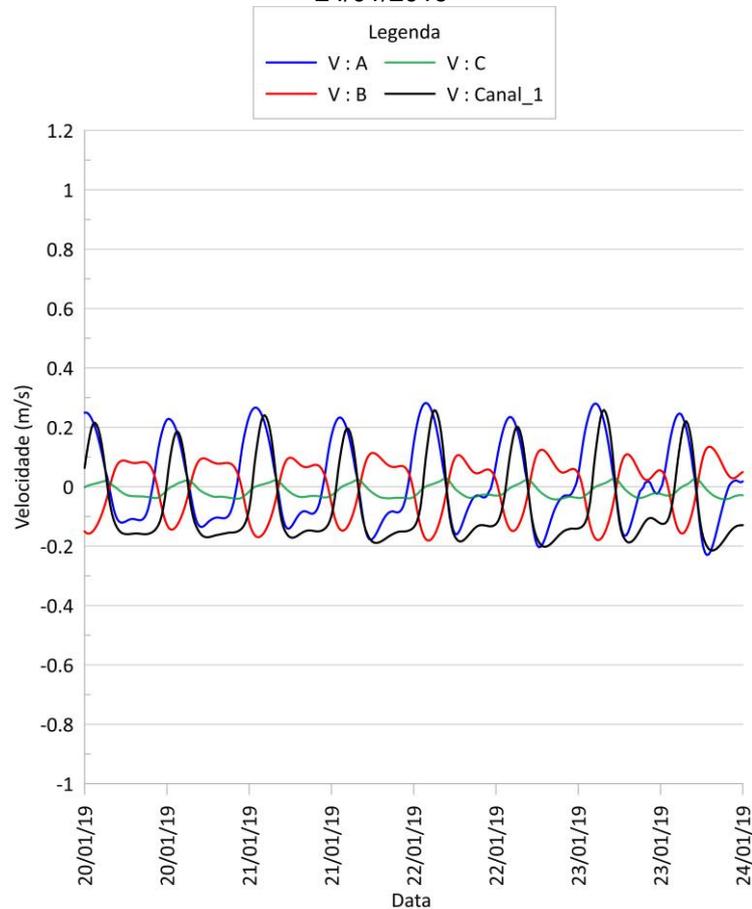
encontradas as maiores velocidades, pois ocorre diminuição da área, com as menores profundidades. Observa-se uma predominância de vazante no canal, devido a descarga fluvial do canal de São Francisco.

FIGURA 23 - COMPONENTES LESTE-OESTE DA VELOCIDADE NAS ESTACÕES A, B, C E CANAL_1 PARA O CENÁRIO Q_{MÉD} NO PERÍODO DE 16 /01/2019 A 24/01/2019



FONTE: A Autora (2021)

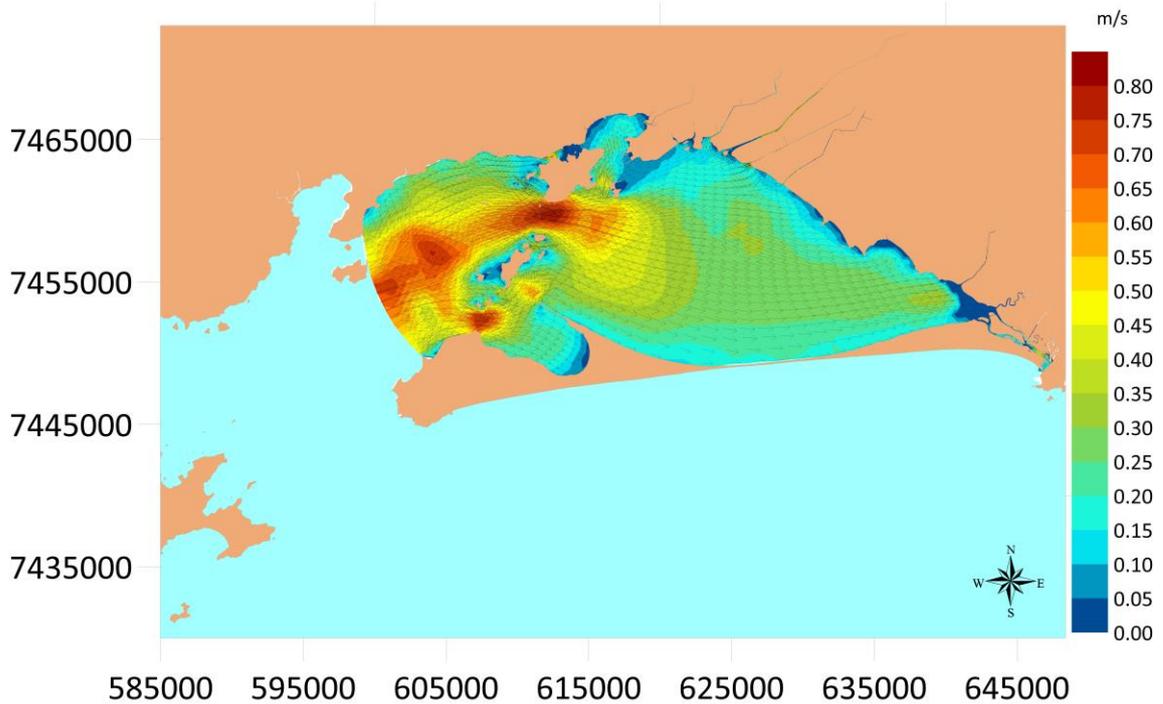
FIGURA 24 - COMPONENTES DE VELOCIDADE NORTE-SUL NA BAÍA DE SEPETIBA NAS ESTACÕES A, B, C E CANAL_1 PARA O CENÁRIO $Q_{MÉD}$ NO PERÍODO DE 16 /01/2019 A 24/01/2019



FONTE: A Autora (2021)

A FIGURA 25 apresenta campo de correntes no instante de maior velocidade (22/01/2019 às 2h15min) no mês de janeiro, no período de sizígia. Os vetores mostram o sentido das correntes, apresentando um momento de enchente. Pode-se observar que os canais formados pelas ilhas tendem a guiar o campo de correntes na direção paralela aos contornos, intensificando seus valores nas regiões estranguladas. As correntes no fundo da baía são menores, o que pode indicar uma troca de massa de água pouco eficiente e, conseqüentemente, ocasiona o aprisionamento de poluentes no interior da baía e uma piora na qualidade da água.

FIGURA 25 - CAMPO DE CORRENTES NA BAÍA DE SEPETIBA, EM INSTANTE DE ENCHENTE, EM 22/01/2019 ÀS 2H15MIN, PARA CENÁRIO DE $Q_{MÉD}$



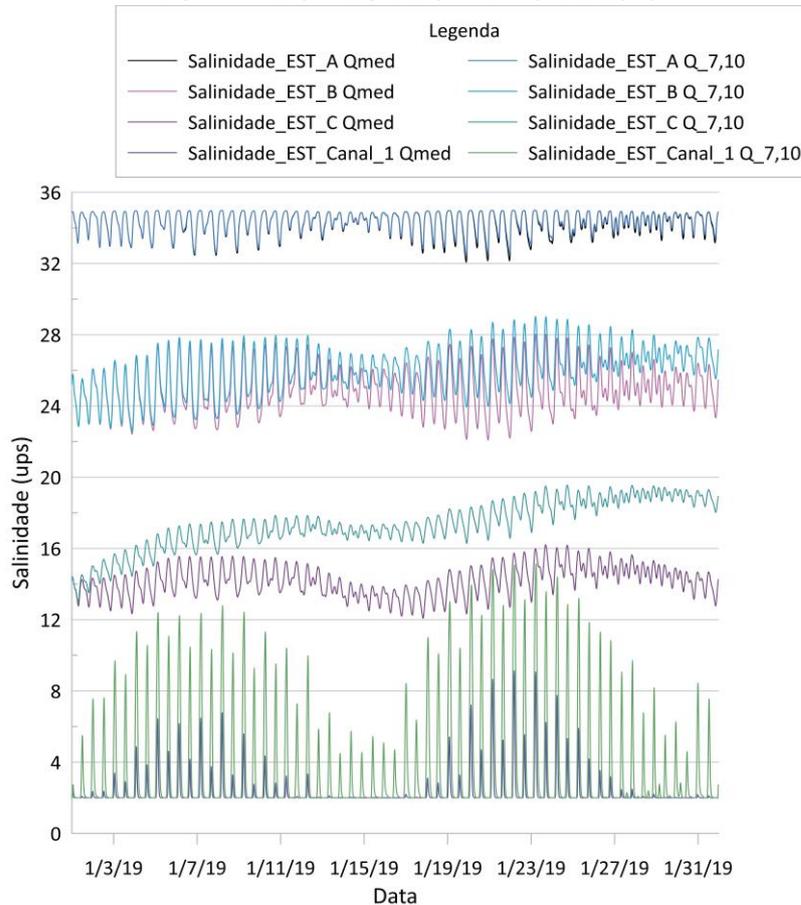
FONTE: A Autora (2021)

5.1.2 SALINIDADE

Os resultados da modelagem do transporte de sal na baía de Sepetiba, apresentados nesta seção, mostram que o sal entra facilmente na baía e como as variações de vazão no canal de São Francisco são importantes no transporte de sal na região mais interna da baía.

A FIGURA 26 mostra a variação da salinidade ao longo de janeiro de 2019 para as estações A, B, C e Canal_1. Conforme mais adentra na baía, maior é a variação no mês e entre as vazões. Na estrada da baía, na estação A, a variação ao longo do mês é pequena, também com poucas variações para as duas vazões. Já dentro do canal (Canal_1), a salinidade é maior em todo o período do mês para $Q_{7,10}$, que é quando a água salina pode entrar com maior facilidade.

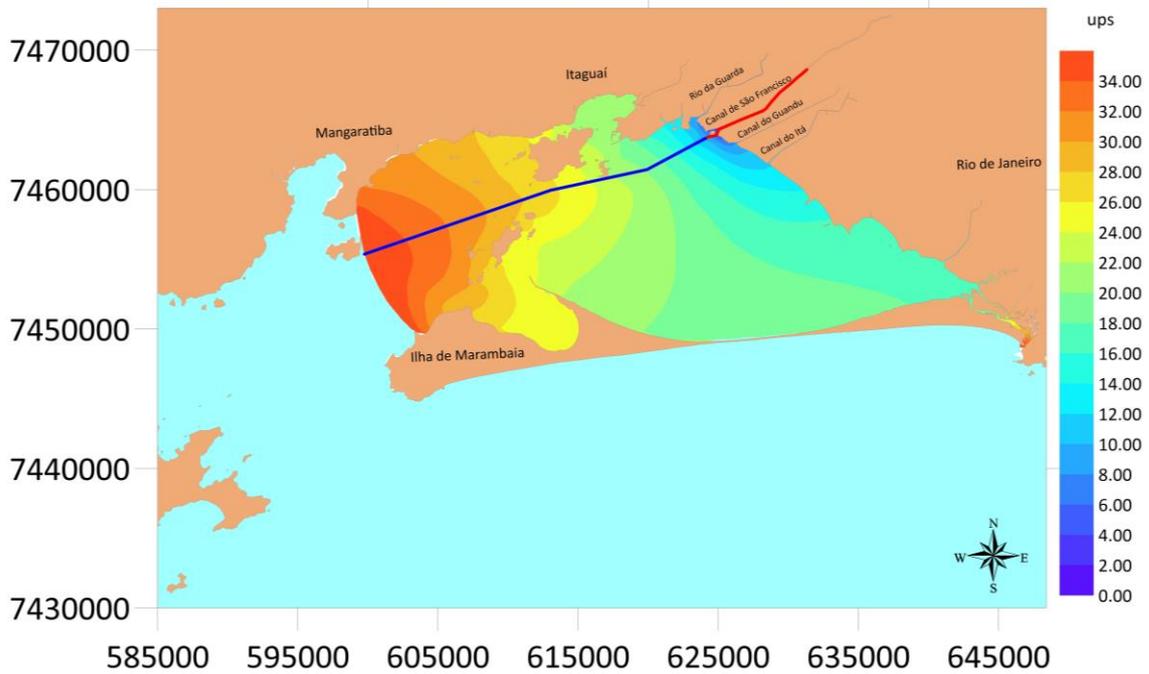
FIGURA 26 - SALINIDADE NAS ESTAÇÕES A, B, C E CANAL_1 PARA CENÁRIO DE $Q_{MÉD}$ E $Q_{7,10}$ DURANTE O MÊS DE JANEIRO DE 2019



FONTE: A Autora (2021)

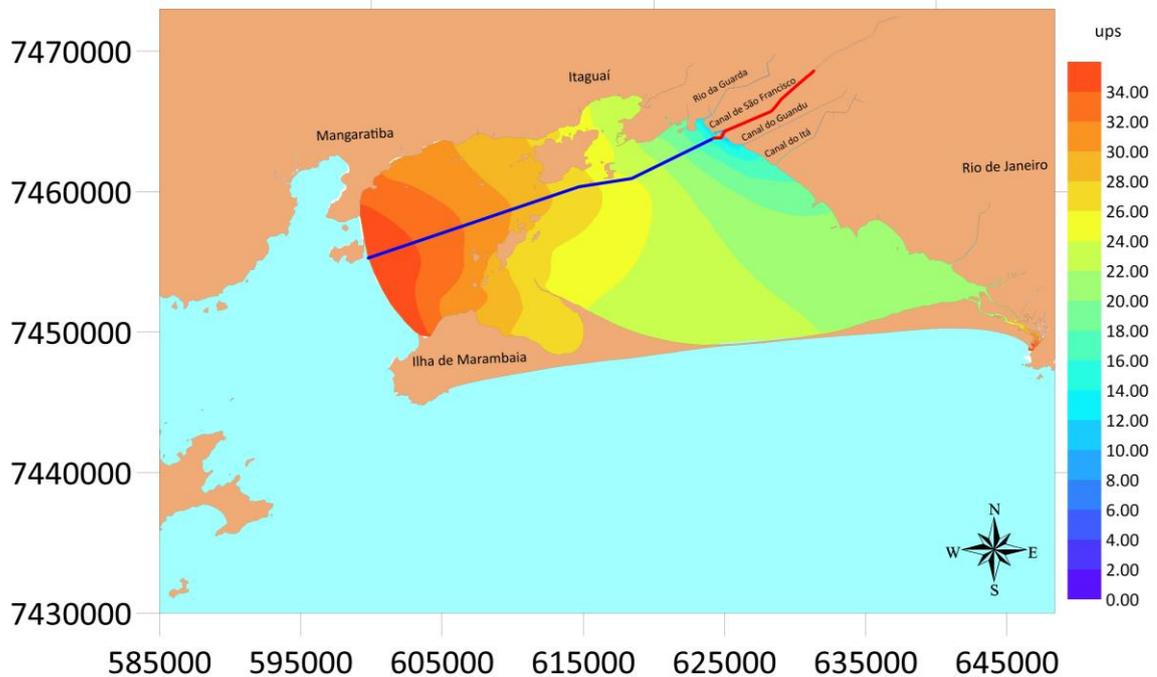
As FIGURAS 27 e FIGURA 28 mostram as variações de salinidade para os cenários $Q_{méd}$ e $Q_{7,10}$ um dos instantes de maior velocidade (22/01/2019 às 2h00min). A distribuição da salinidade é semelhante na entrada da baía, comparando os dois cenários, variando significativamente apenas nas desembocaduras dos rios. Quando as vazões são maiores ($Q_{méd}$), a salinidade é ligeiramente menor quando comparada com o cenário de vazão menor ($Q_{7,10}$). Com a vazão $Q_{7,10}$, a maré consegue adentrar com maior facilidade naquela região, aumentando significativamente as concentrações de sal.

FIGURA 27 - DISTRIBUIÇÃO DE SALINIDADE NA BAÍA DE SEPETIBA, NO INSTANTE 22/01/2019 ÀS 2H00MIN, PARA CENÁRIO DE $Q_{MÉD}$, E A LOCALIZAÇÃO DOS PERFIS LONGITUDINAIS.



FONTE: A Autora (2021)

FIGURA 28 - DISTRIBUIÇÃO DE SALINIDADE NA BAÍA DE SEPETIBA, NO INSTANTE 22/01/2019 ÀS 2H00MIN, PARA CENÁRIO DE $Q_{7,10}$, E A LOCALIZAÇÃO DOS PERFIS LONGITUDINAIS

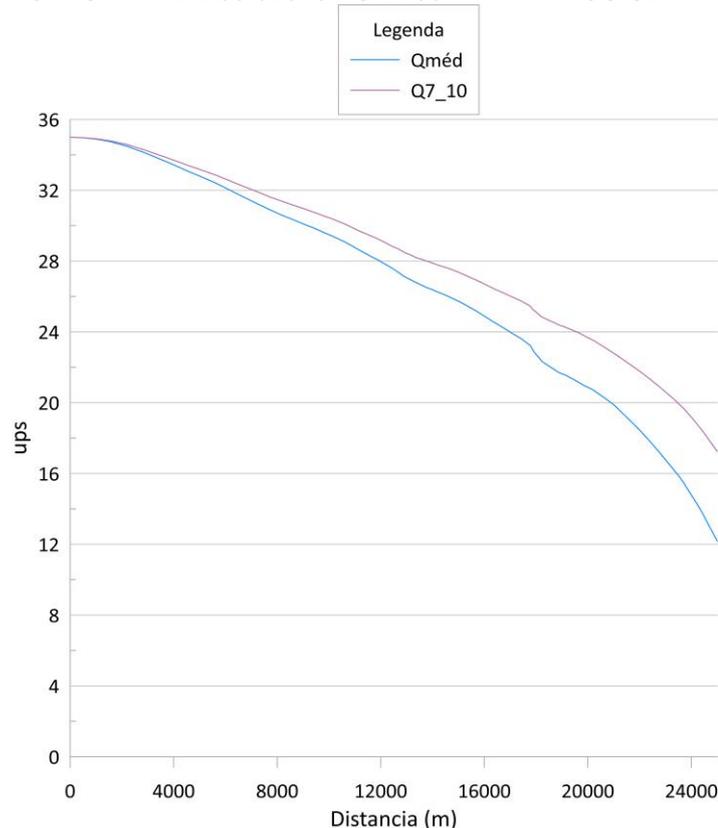


FONTE: A Autora (2021)

Para melhor observar o comportamento da salinidade ao longo da baía, foram observadas as concentrações de sal ao longo de perfis longitudinais, cuja as

localizações são apresentadas nas FIGURAS 27 e 28. Foram definidos dois perfis: um dentro da baía (linhas azuis) e outro na região do canal de São Francisco (linhas vermelhas). Na baía de Sepetiba, o perfil se inicia na entrada da baía (0 m) e termina na entrada do canal de São Francisco, após 25 Km. Os resultados são mostrados na FIGURA 29. Até aproximadamente 6 Km da entrada da baía, não ocorre variação significativa na salinidade, quando se comparara os cenários de $Q_{méd}$ e $Q_{7,10}$, pois esta região não sofre influência direta das vazões fluviais. No entanto, nos últimos 7 km próximo a foz do canal de São Francisco, é visível uma diminuição da salinidade pra vazões maiores ($Q_{méd}$), chegando a 12 ups na entrada do canal. Para vazões menores ($Q_{7,10}$), a salinidade é de aproximadamente 17 ups no final do perfil, mostrando assim, a região de influência das variações de vazões do canal de São Francisco.

FIGURA 29 - SALINIDADE AO LONGO DO PERFIL LONGITUDINAL NO INTERIOR DA BAÍA DE SEPETIBA, PARA O INSTANTE 22/01/2019 ÀS 2H00MIN PARA OS CENÁRIOS $Q_{MÉD}$ E $Q_{7,10}$



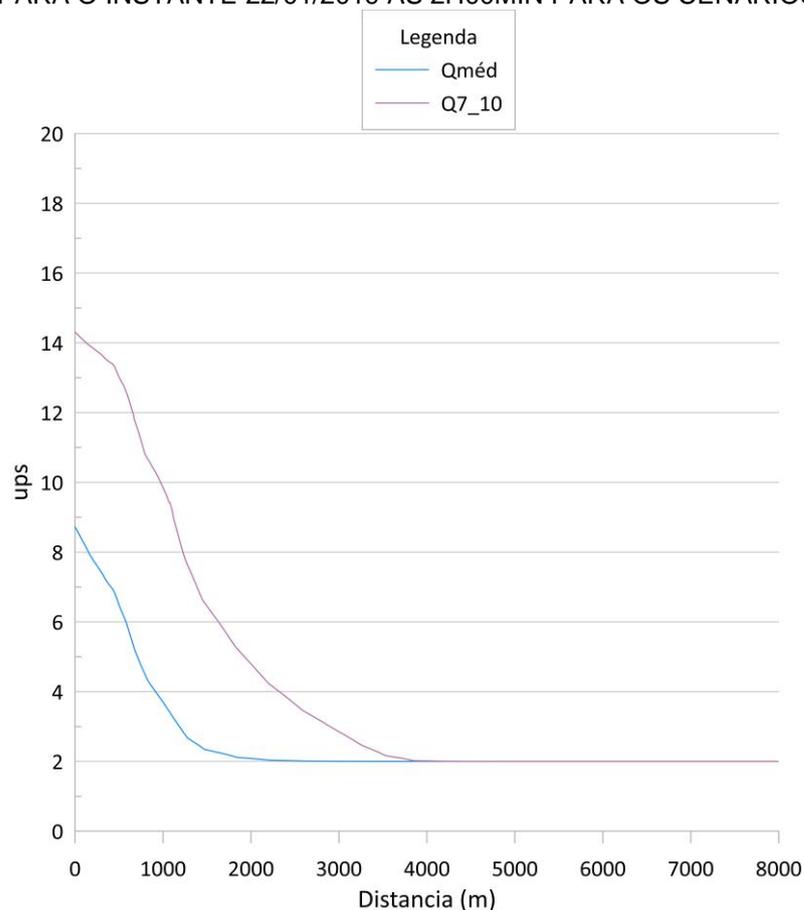
FONTE: A Autora (2021)

Para o perfil localizado dentro do canal de São Francisco, mostrado na FIGURA 30, é possível observar claramente a intrusão salina. Na entrada do canal, que corresponde ao início do perfil (0 m), já é possível observar diferenças para os

dois cenários. Para $Q_{méd}$, a salinidade é menor na entrada, chegando a um pouco menos que 9 ups; nessa situação, o sal adentra até aproximadamente 2.000 m do canal. Já para $Q_{7,10}$, na entrada do canal, a salinidade é em torno de 14 ups, alcançando valores superiores a 2 ups (condição de contorno do canal) em até 4.000 m da entrada do canal.

A diminuição da vazão no canal ocasiona um maior alcance da intrusão salina, afetando o funcionamento de empreendimentos instalados na margem. Para situações de $Q_{7,10}$, a salinidade pode chegar até a entrada UTE Santa Cruz e CSA, que poderá captar água salobra. Quando a vazão é $Q_{méd}$, o alcance da intrusão salina não atinge os empreendimentos instalados na região.

FIGURA 30 - SALINIDADE AO LONGO DO PERFIL LONGITUDINAL DO CANAL DE SÃO FRANCISCO PARA O INSTANTE 22/01/2019 ÀS 2H00MIN PARA OS CENÁRIOS $Q_{MÉD}$ E $Q_{7,10}$



FONTE: A Autora (2021)

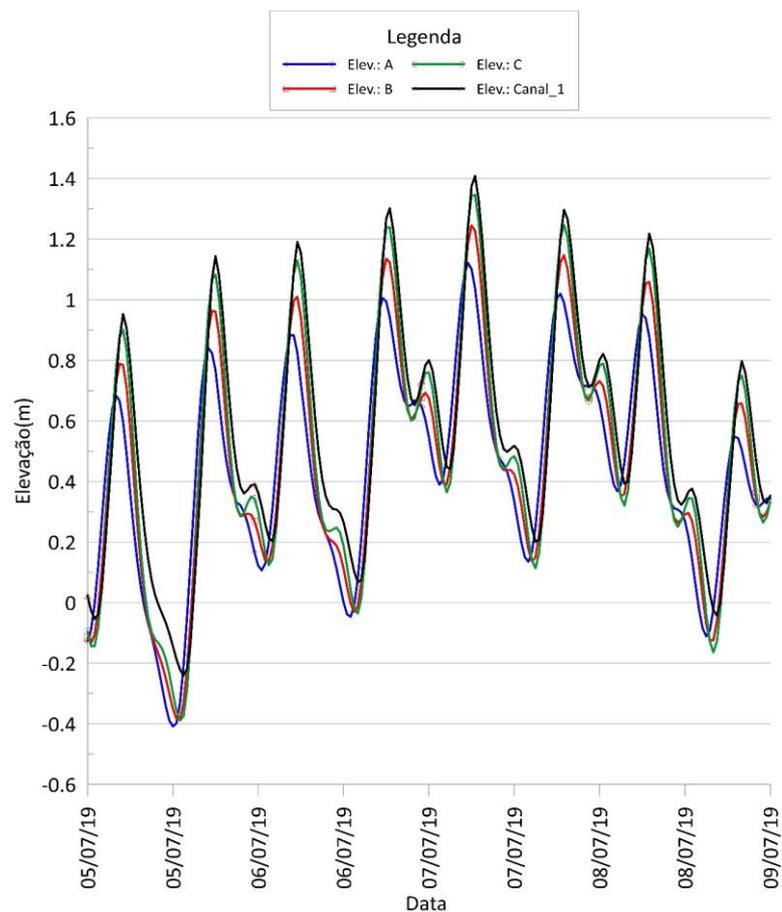
5.2 INVERNO

5.2.1 CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA

Para o cenário de inverno é mostrado apenas os resultados da circulação hidrodinâmica para a vazão $Q_{\text{méd}}$, pois comparando com a $Q_{7,10}$, apenas ocorre variação nas correntes na região próxima ao canal de São Francisco.

Para um período de quatro dias, durante uma sizígia, as elevações são apresentadas na FIGURA 31. A onda de maré também sofre amplificação quando se propaga para o interior da baía, devido à batimetria de fundo. Quando comparado com o cenário de verão, são visíveis maiores amplitudes, chegando a 1,4 m.

FIGURA 31 - ELEVÇÃO NAS ESTACÕES A, B, C E CANAL_1 ENTRE 05/07/2019 E 09/07/2019 PARA O CENÁRIO DE $Q_{\text{MÉD}}$

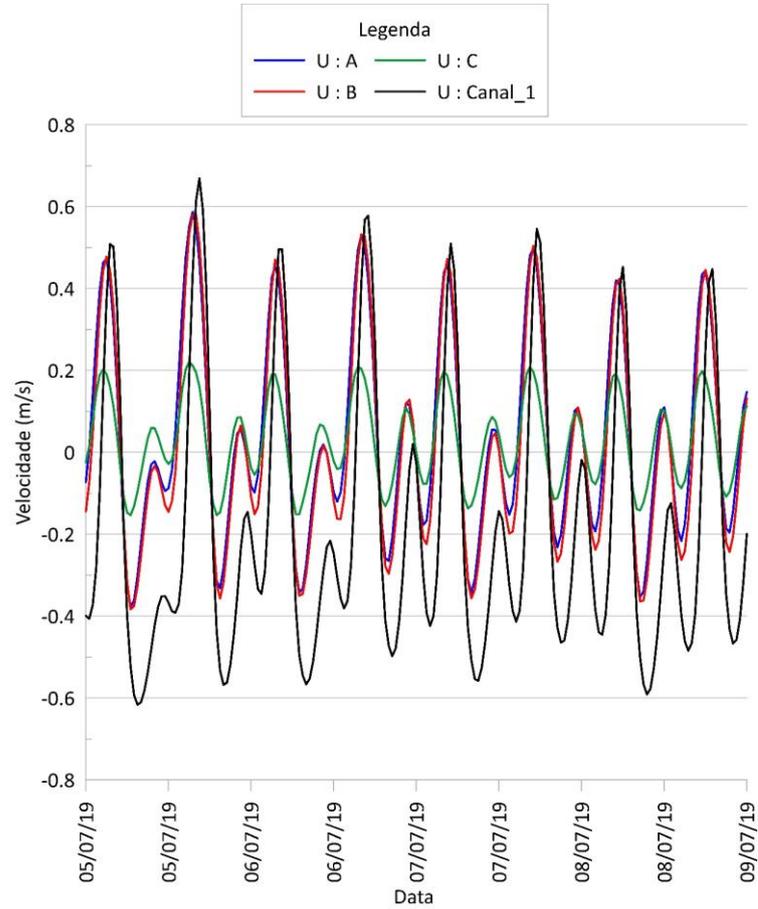


FONTE: A Autora (2021)

Nas FIGURAS 32 e 33 estão dispostos os componentes Leste-Oeste e Norte-Sul das velocidades, respectivamente, para o período de 05/07/2019 a 09/07/20219, no período de sizígia, quando os valores das correntes são significativamente

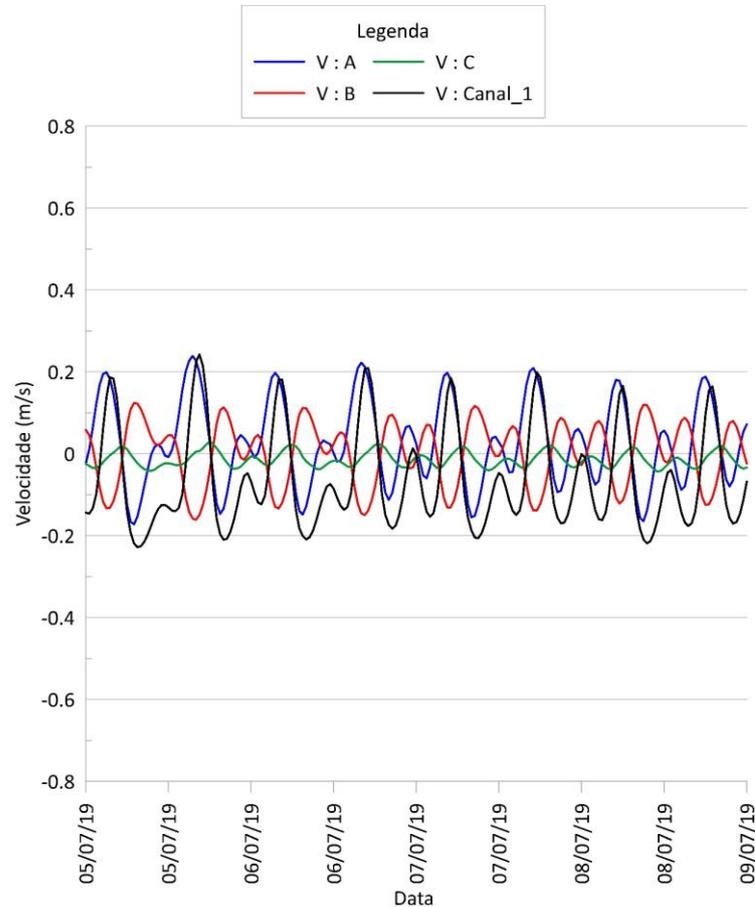
maiores. As componentes Leste-Oeste e Norte-Sul das velocidades não variam significativamente entre o inverno e verão.

FIGURA 32 - COMPONENTES DE VELOCIDADE LESTE-OESTE NA BAÍA DE SEPETIBA PARA $Q_{MÉD}$ NO PERÍODO DE 05/07/2019 A 09/07/2019



FONTE: A Autora (2021)

FIGURA 33 - COMPONENTES NORTE-SUL DA VELOCIDADE NA BAÍA DE SEPETIBA PARA $Q_{MÉD}$
NO PERÍODO DE 05/07/2019 A 09/07/2019



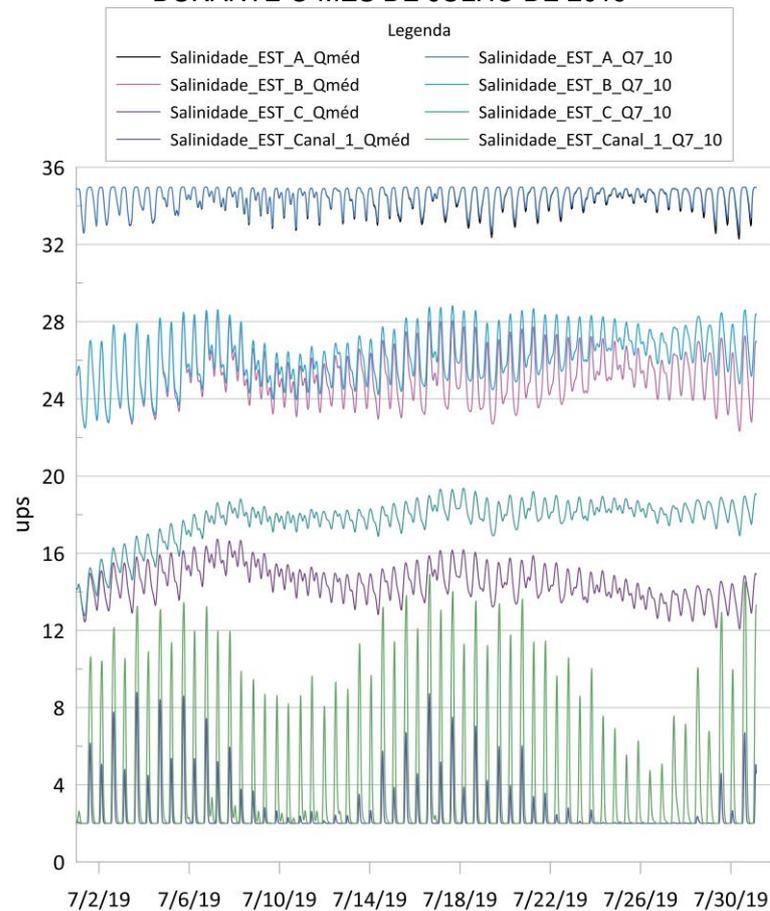
FONTE: A Autora (2021)

5.2.2 SALINIDADE

Na baía de Sepetiba, a modelagem da salinidade apresentada mostra que a intrusão salina adentra com facilidade no canal e também sofre com as variações de vazão, assim como para o cenário de verão.

A FIGURA 34 mostra a variação da salinidade ao longo do mês de julho de 2019. É possível verificar variação mais intensa da salinidade nos pontos mais internos da baía, principalmente no canal de São Francisco (Canal_1). Em vazões menores ($Q_{7,10}$), a salinidade possui os maiores valores de salinidade.

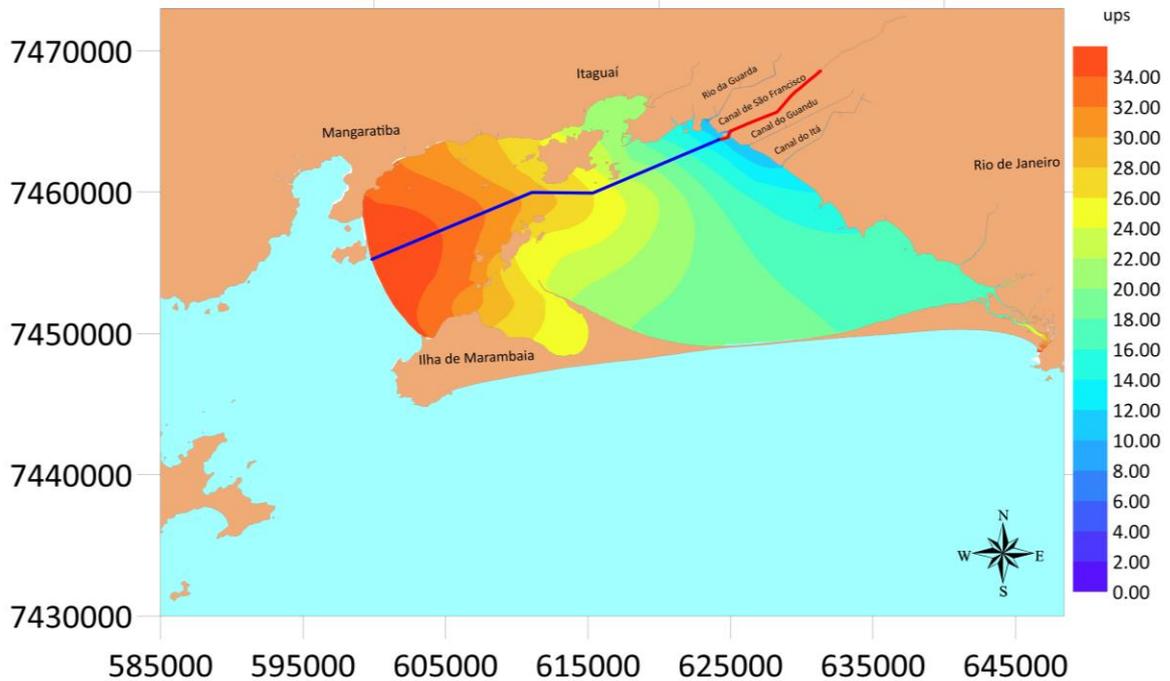
FIGURA 34 - SALINIDADE NAS ESTAÇÕES A, B, C E CANAL_1 PARA CENÁRIO DE $Q_{MÉD}$ E $Q_{7,10}$ DURANTE O MÊS DE JULHO DE 2019



FONTE: A Autora (2021)

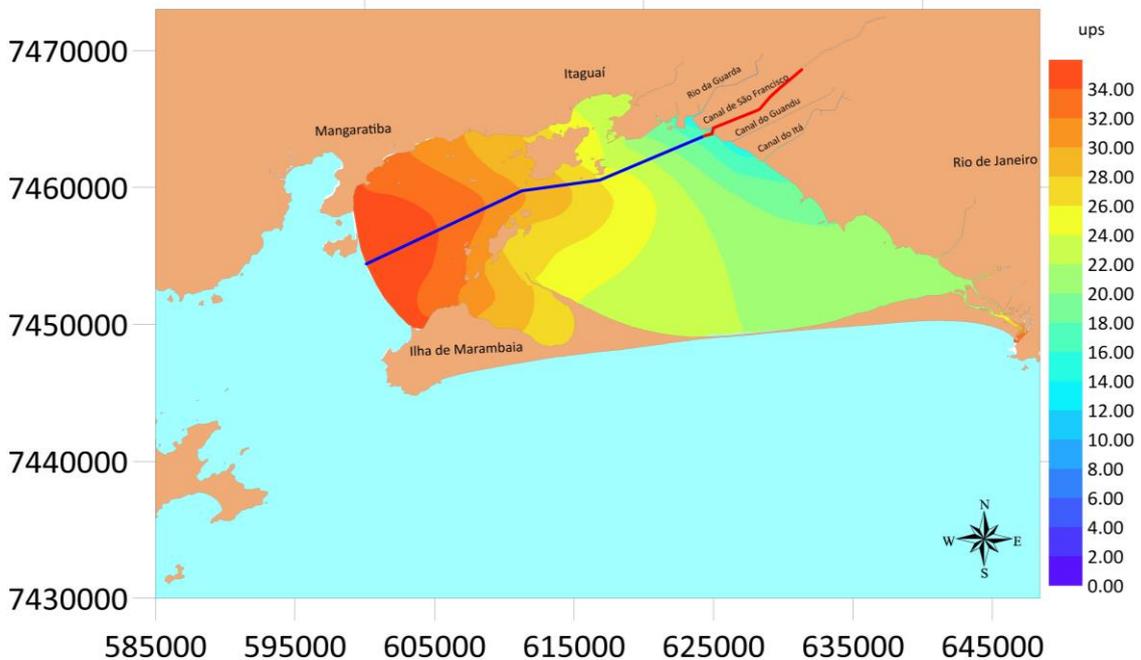
Quando comparado os quatro cenários (verão $Q_{méd}$, verão $Q_{7,10}$, inverno $Q_{méd}$ e inverno $Q_{7,10}$), a distribuição da salinidade é semelhante na entrada da baía; próximo as desembocaduras dos rios, esses valores variam significativamente. Para a vazão $Q_{méd}$, os valores próximos às desembocaduras dos rios são ligeiramente maiores para o inverno, adentrando com maior facilidade no canal. Já para $Q_{7,10}$, a salinidade próxima aos rios é significativamente maior. As FIGURAS 35 e 36 mostram a salinidade para um dos instantes de maior velocidade (03/07/2019 às 13h00min).

FIGURA 35 - DISTRIBUIÇÃO DE SALINIDADE NA BAÍA DE SEPETIBA, NO INSTANTE 03/07/2019 ÀS 14H00MIN, PARA CENÁRIO DE $Q_{MÉD}$, E A LOCALIZAÇÃO DOS PERFIS LONGITUDINAIS



FONTE: A Autora (2021)

FIGURA 36 - DISTRIBUIÇÃO DE SALINIDADE NA BAÍA DE SEPETIBA, NO INSTANTE 03/07/2019 ÀS 14H00MIN, PARA CENÁRIO DE $Q_{7,10}$, E A LOCALIZAÇÃO DOS PERFIS LONGITUDINAIS

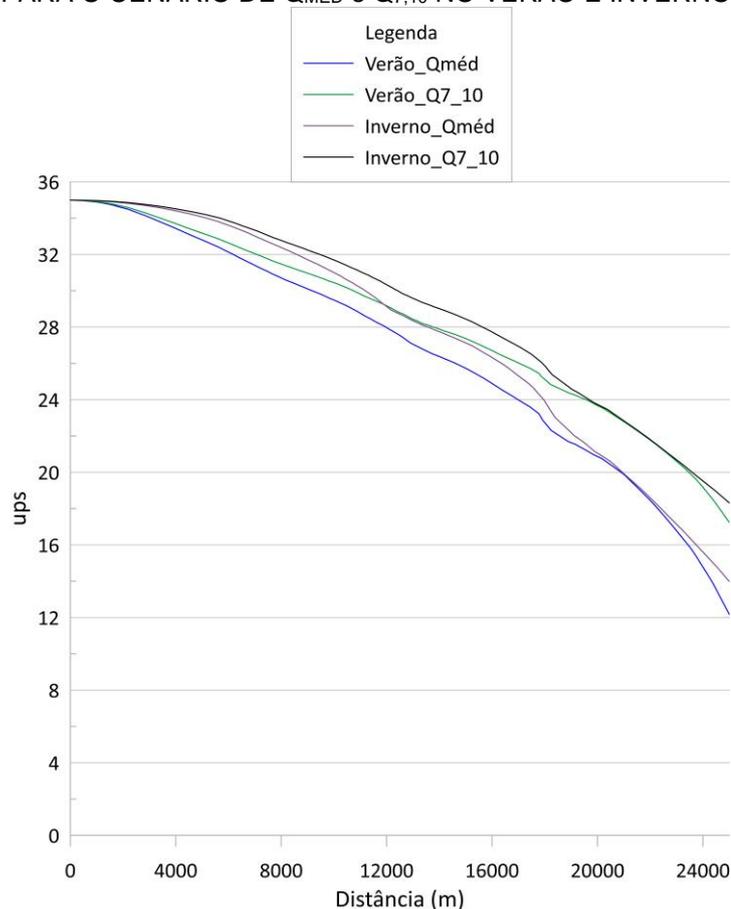


FONTE: A Autora (2021)

Foram definidos dois perfis longitudinais para o mês de julho, apresentados na FIGURA 37, para observar melhor o comportamento da salinidade: um dentro da

baía (linhas azuis) e outro no canal de São Francisco (linhas vermelhas), retirados das FIGURAS 35 e 36. Na entrada da baía, a concentração de sal para os quatro cenários é a mesma, pois a região não possui influência das vazões fluviais. À medida que se aproxima das desembocaduras dos rios, a salinidade varia. Para a condição de $Q_{\text{méd}}$, nas duas estações, ocorre uma mais rápida diminuição da salinidade no verão, quanto mais próximo ao canal de São Francisco. Quando as vazões são menores ($Q_{7,10}$), para o cenário de verão ocorre uma diminuição mais rápida quando se aproxima do canal, com concentrações de aproximadamente 12 ups, enquanto para o inverno, os valores ficam próximo aos 14 ups.

FIGURA 37 - PERFIL DA SALINIDADE LONGITUDINAL NO INTERIOR DA BAÍA DE SEPETIBA PARA O CENÁRIO DE $Q_{\text{MÉD}}$ E $Q_{7,10}$ NO VERÃO E INVERNO



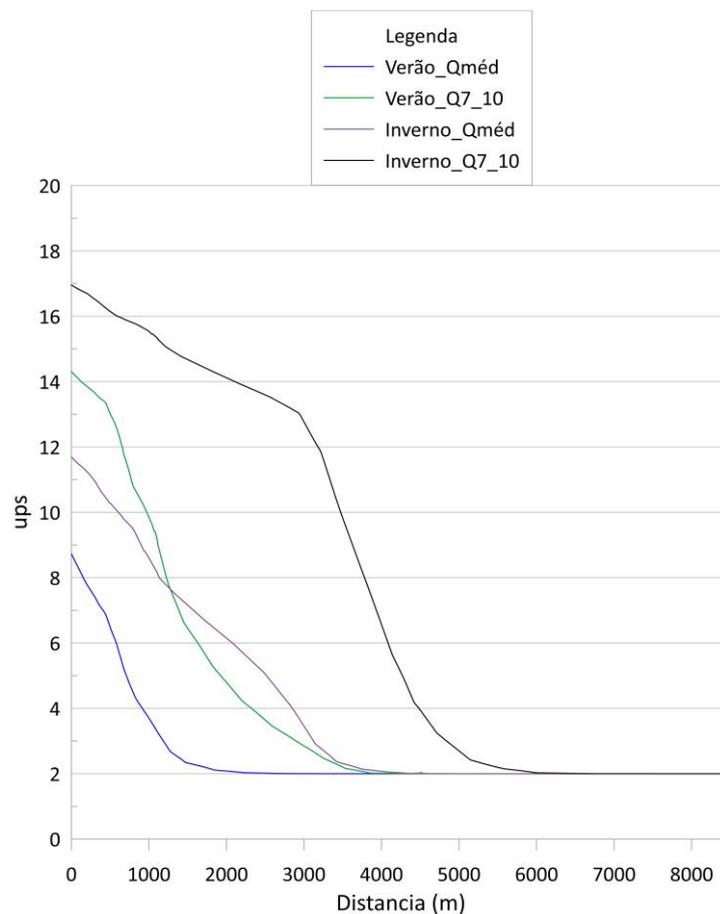
FONTE: A Autora (2021)

O início do perfil longitudinal do canal de São Francisco corresponde a entrada do canal, representado na FIGURA 38. Quando as vazões são maiores ($Q_{\text{méd}}$), a salinidade fica menor na entrada, adentrando um pouco mais de 4000 m para o inverno. Já para $Q_{7,10}$, na entrada do canal, a salinidade é próxima aos 14 ups

para o verão e aos 17 ups para o inverno; o alcance da intrusão salina é de 4.000 m em janeiro, enquanto para o inverno, fica próxima a 6.000 m.

Em julho, para o cenário com a menor vazão ($Q_{7,10}$), as concentrações de sal na entrada do canal são maiores. O alcance da intrusão salina chega a 5.000 m e afeta a captações dos empreendimentos localizados próximos as margens.

FIGURA 38 - PERFIL DA SALINIDADE LONGITUDINAL DO CANAL DE SÃO FRANCISCO PARA O CENÁRIO DE $Q_{MÉD}$ e $Q_{7,10}$ NO VERÃO E INVERNO



FONTE: A Autora (2021)

6 CONCLUSÃO

Visando analisar o alcance da intrusão salina no canal de São Francisco, na baía de Sepetiba, é apresentado neste trabalho a aplicação do modelo hidrodinâmico acoplado ao modelo de transporte de sal do SisBaHiA[®]. O modelo computacional utilizado mostrou-se adequado em representar a variação da salinidade ao longo da baía, possibilitando realizar a simulação para diferentes cenários.

Foram utilizadas duas vazões distintas no canal de São Francisco, $Q_{méd}$ e $Q_{7,10}$, para avaliar a variação da intrusão salina no canal. Não houve variação significativa da salinidade na região externa e central da baía para essas duas vazões no verão. Já na entrada do canal de São Francisco, é possível verificar uma maior salinidade para vazões menores ($Q_{7,10}$). Comparando a salinidade na entrada do canal de São Francisco, é possível verificar uma pequena diminuição da salinidade, tanto para os cenários com $Q_{méd}$ e $Q_{7,10}$, para o inverno

Ao longo do canal, comparando as duas vazões, é visível o maior alcance da intrusão salina para $Q_{7,10}$, tanto no inverno quanto no verão. A salinidade afeta ao longo de 2.000 m no canal de São Francisco para cenário com a vazão $Q_{méd}$ e 4.000 m para o cenário com a vazão $Q_{7,10}$, no verão. No inverno os valores são 6.000 m para o cenário com a vazão $Q_{7,10}$ e 4.000 para a vazão $Q_{méd}$.

Nas margens do canal de São Francisco estão instalados diversos empreendimentos com pontos de outorga para captação. Como a intrusão salina possui maior alcance com a diminuição das vazões fluviais, esses empreendimentos poderão ser afetados, captando água salobra. Possivelmente, em épocas de secas, a dificuldade em captar água doce pode comprometer o funcionamento desses empreendimentos.

Neste trabalho foi possível observar uma boa representação do comportamento da intrusão salina no canal de São Francisco. O modelo não foi calibrado devido a falta de informações disponíveis, porém os resultados se mostraram compatíveis com os observados por PEREIRA (2006).

Prevendo períodos de secas mais intensas, que faz com que a hidrelétrica a montante do canal de São Francisco represe maior volume de água, faz se necessário o estudo aprofundado para que medidas mitigadoras possam ser desenvolvidas. Também, com o aumento da população no Rio de Janeiro,

recomenda-se um estudo prevendo cenários de maior captação de água na ETA Guandu, que irá diminuir a vazão do canal de São Francisco.

REFERÊNCIAS

- ANDREWS, S.W. *et al.* Modeling salt intrusion in the San Francisco Estuary prior to anthropogenic influence. **Continental Shelf Research**, v. 146, p. 58-81, ago. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2017.07.010>.
- AMARAL, K.J. Estuário do Rio Macaé: Modelagem Computacional como ferramenta para o gerenciamento integrado de recursos hídricos. 2003. Tese - Pós-graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro (RJ), 2003.
- BECKER, M. L. *et al.* Hydrodynamic behaviour of the Cape Fear River and estuarine system: a synthesis and observational investigation of discharge: salinity intrusion relationships. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 88, n. 3, p. 407-418, jul. 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2010.04.022>.
- CARVALHO, G.B.B. *et al.* Cobrança pelo uso de Recursos Hídricos na transposição da bacia hidrográfica do rio Paraíba do sul para a bacia hidrográfica do rio Guandu. In: XVII **Simpósio Brasileiro de recursos Hídricos**, 2007, São Paulo.
- CEDAE, Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro. **Guandu**. Disponível em: https://cedae.com.br/portals/0/livreto_guandu.pdf. Acesso em: 05 jun. 2021.
- COMITÊ GUANDU. Disponível em: <http://www.comiteguandu.org.br/>. Acesso em: 10 jun. 2021.
- COMITÊ GUANDU. **Relatório Executivo do PERH - Guandu**. Rio de Janeiro, 2018.
- CUNHA, C. L.N. *et al.* Caracterização da Circulação Hidrodinâmica Bidimensional da Baía de Sepetiba. In: **Anais do XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICO e V SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LÍNGUA OFICIAL PORTUGUESA**, 2001, Aracaju: ABRH – Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2001. p. 151–151.
- FILHO, L.C.R.S. **Análise da Gestão costeira em baías: O caso da Baía de Sepetiba**, Rio de Janeiro, 2015. Dissertação – Pós-Graduação em Planejamento Energético, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro (RJ), 2015.
- JORDÃO, M.L. Influência da transposição de bacias do paraíba do sul-piraí-guandu na descarga de sólidos suspensos para a baía de Sepetiba. 2017. Tese - Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro (RJ), 2017.
- JORDÃO, M.L. *et al.* Sedimentos Poluente da Estação de Tratamento de água do Guandu. In: **HIDROSEDIMENTOLOGIA NO CONTEXTO NEXO PARA UMA SOCIEDADE SUSTENTÁVEL**, 2018, Vitória - ES.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Glossário dos Termos Genéricos dos Nomes Geográfico Utilizado no Mapeamento Sistemático do Brasil**. Rio de Janeiro (RJ), 2015. p.14.

INMET, Instituto Nacional de Meteorologia. **Banco de dados meteorológicos**. 2019. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/>. Acesso em: 16 jun. 2021.

MINH, T. *et al.*. Drivers of change and adaptation pathways of agricultural systems facing increased salinity intrusion in coastal areas of the Mekong and Red River deltas in Vietnam. **Environmental Science & Policy**, v. 92, p. 331-348, fev. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2018.10.016>.

MIRANDA, L. B. *et al.*, 2002, **Princípios de oceanografia física de estuários**, 1ª ed., São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo – EDUSP.

PEREIRA, V. S. A. **Proposta de uma metodologia para análise de outorgas de uso de água em regiões sujeitas à influência da maré**, Rio de Janeiro, 2006. Dissertação – Pós-Graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro (RJ), 2006.

ROSMAN, P.C.C *et al.* **Baias de Ilha Grande e Sepetiba**. 2018. Disponível em: http://www.baiasdobrasil.coppe.ufrj.br/assets/relatorios/rel_ilhagrande_sepetiba.html. Acesso em: 20 jun. 2021.

ROSMAN, P. C. C. 2021. **Referência Técnica do SisBaHiA**.

SEMADS, 2001, **Bacias Hidrográficas e Recursos Hídricos da macrorregião 2 - Bacia da Baía de Sepetiba**, In: Projeto PLANÁGUA SEMADES/GTZ de cooperação técnica Brasil-Alemanha, Rio de Janeiro.

STÜKER, E. *et al.* Comparação entre os dados de vento das reanálises meteorológicas ERA-Interim e CFSR com os dados das estações automáticas do INMET no rio grande do sul. **Ciência e Natura**, [S.L.], v. 38, p. 284, 20 jul. 2016. Universidade Federal de Santa Maria. <http://dx.doi.org/10.5902/2179460x20233>.

VILLENA, H.H. *et al.*. Índícios da variação do nível do mar na baía de Sepetiba. In: RODRIGUES, M. A. C. **Sepetiba - Estado da Arte**. Rio de Janeiro: Uerj, 2012. p. 44.

WALLCRAFT, A. J.; METZGER, E. J.; CARROLL, S. N. Design Description for the Hybrid Coordinate Ocean Model (HYCOM) Version 2.2. Laboratório de Pesquisa Naval. Condado de Hancock: Centro Espacial Stennis, 2009. Relatório Técnico.

WANG, J. *et al.* Numerical modelling study of seawater intrusion in Indus River Estuary, Pakistan. **Ocean Engineering**, v. 184, p. 74-84, jul. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.05.029>.