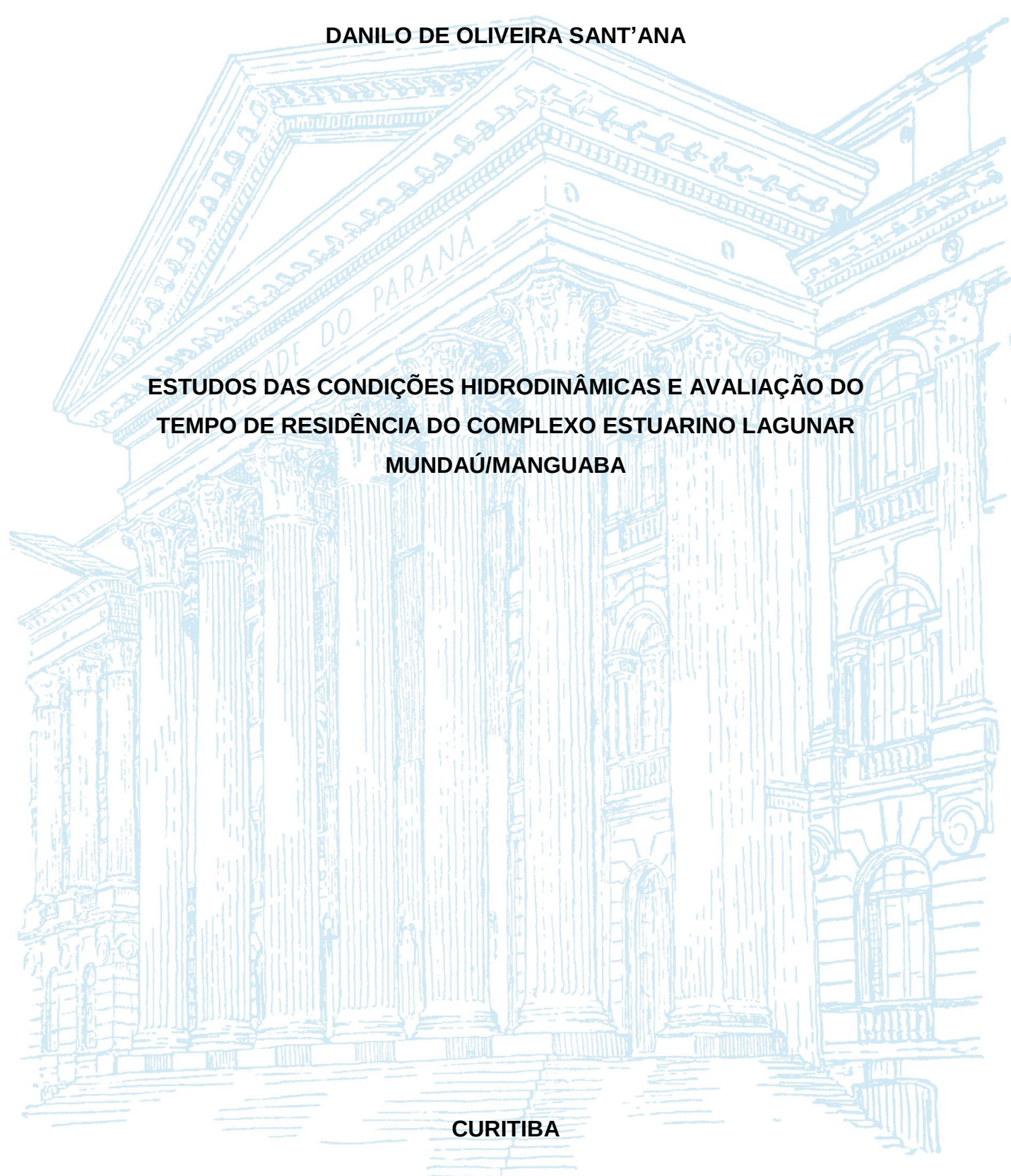




DANILO DE OLIVEIRA SANT'ANA

**ESTUDOS DAS CONDIÇÕES HIDRODINÂMICAS E AVALIAÇÃO DO
TEMPO DE RESIDÊNCIA DO COMPLEXO ESTUARINO LAGUNAR
MUNDAÚ/MANGUABA**

CURITIBA

2019

DANILO DE OLIVEIRA SANT'ANA

**ESTUDOS DAS CONDIÇÕES HIDRODINÂMICAS E AVALIAÇÃO DO
TEMPO DE RESIDÊNCIA DO COMPLEXO ESTUARINO LAGUNAR
MUNDAÚ/MANGUABA**

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

Orientadora: Prof^a Dra. Cynara de L. da N.
Cunha.

CURITIBA

2019



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

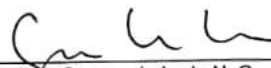
TERMO DE APROVAÇÃO DE PROJETO FINAL

DANILO DE OLIVEIRA SANTANA

ESTUDOS DAS CONDIÇÕES HIDRODINÂMICAS E AVALIAÇÃO DO TEMPO DE
RESIDÊNCIA DO COMPLEXO ESTUARINO LAGUNAR MUNDAÚ/MANGUABA

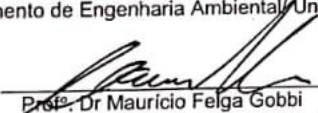
Projeto Final de Curso, aprovado como requisito parcial para a obtenção do Diploma de Bacharel em Engenharia Ambiental no Curso de Graduação em Engenharia Ambiental do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, com nota 80,0, pela seguinte banca examinadora:

Orientador (a):


Profª. Dra. Cynara de L. da N. Cunha

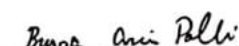
Departamento de Engenharia Ambiental/ Universidade Federal do Paraná

Membro (a) 1:


Prof. Dr. Mauricio Felga Gobbi

Departamento de Engenharia Ambiental/ Universidade Federal do Paraná

Membro (a) 2:


Profª Bruna Arcie Polli

Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental / Universidade Federal do Paraná

Curitiba, 11 de dezembro de 2014

AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer a minha orientadora, a Professora Cynara que, com sua enorme paciência e conhecimento, auxiliou-me na execução deste trabalho e, a cada dia que se passou, torna-se uma inspiração para mim.

A minha família que em todos os momentos difíceis me ajudaram a não desistir dos meus objetivos. Em especial aos meus pais Dirceu e Dirce, que meu maior objetivo é dar orgulho a eles. Um agradecimento especial a minha irmã Manuela que corrigiu os meus textos nessa caminhada.

Aos meus amigos que me deram apoio, em especial a Tabata e a Fabiola. Ambas sempre me deixaram feliz com suas companhias.

Por fim, quero agradecer a todos que participaram dessa minha jornada e que me suportaram neste momento.

“A vida é muito curta para ser pequena”.
(Benjamin Disrael)

RESUMO

As lagunas ocupam 13% das áreas costeiras no mundo, localizadas principalmente nas regiões tropicais e subtropicais; podem ser forçadas pelo aporte fluvial, pelo vento e em menor intensidade, pela maré. Este trabalho apresenta a modelagem ambiental com cálculo do tempo de residência e escoamento residual para o Complexo Estuarino Lagunar Mundaú/Manguaba, localizada no litoral do estado de Alagoas. O complexo é formado por duas lagunas, Mundaú e Manguaba, possuindo uma área de 126 km². O modelo bidimensional de circulação hidrodinâmica do SisBaHiA® – Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental – foi usado nas simulações desenvolvidas para o ano de 2014, estabelecendo cenários para o período chuvoso e de estiagem na região, analisando em especial o mês de outubro de 2014, onde houve uma abrupta elevação nos valores de vazões dos rios que abastecem as lagunas. Os resultados obtidos pelo modelo foram confrontados com dados da posição da superfície livre medidos em dois pontos do complexo, apresentando uma boa concordância. O modelo mostra ainda que o canal que conecta as lagunas ao oceano funciona como um filtro dinâmico, diminuindo os efeitos da oscilação de maré no interior das lagunas. As velocidades das correntes no canal não ultrapassam 0,60 m/s, em situação de maré de sizígia, e 0,30 m/s, em situação de maré de quadratura, enquanto que nas lagunas as velocidades são reduzidas. As velocidades residuais são extremamente baixas nas lagunas. Para o modelo Lagrangeano, que calcula o tempo de residência, foi adotado em diferentes cenários diferentes valores para o coeficiente de absorção das partículas, mostrando que a Laguna Manguaba apresenta os maiores valores para tempo de residência, chegando a 75 dias, na região norte.

Palavras-chave: Complexo Estuarino Lagunar Mundaú/Manguaba, SisBaHiA®, Escoamento residual, Tempo de residência.

ABSTRACT

Lagoons occupy 13% of the coastal areas around the world. Primarily localized in tropical and subtropical regions, can be force by river contribution, wind and, in less intensity, by the ocean tide. This study shows the environmental modeling using calculation of the residence time and residual flow for the Lagunar Mundaú Estuarine Complex/Manguaba, located on the coast of the state of Alagoas. The complex is formed by two lagoons, Mundaú and Manguaba, having an area of 126km². The two-dimensional hydrodynamic circulation model of SisBaHiA[®] - in Portuguese, Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental - was used in the simulations developed in 2014, with scenarios for the dry and rainy period at the region, analysing with more details 2014 october, when a sudden elevation of the flow values of the rivers that supply the lagoons. The results obtained by the model were confronted with free surface position data measured in two points of the complex, showing good conformity. The model also shows that the canal connecting the lagoons to the ocean works as a dynamic filter, lowering the effect of tide oscillation on the interior of the lagoons. The current speed did not go above 0,60 m/s, in situation of maximum tidal wave, and 0,30 m/s, in situation of quadrature tide; in the lagoons the speed are reduced. For the Lagrangian model, which calculates the residence time, it was adopted in different scenarios in relation of the particles absorption, showing that the Manguaba Lagoon features the higher values, reaching the north region in 75 days.

Keywords: Lagunar Mundaú Estuarine Complex/Manguaba, SisBaHiA[®], Residence Time, Residual Disposal.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Local de estudo (Lima, 2017)	18
Figura 2 – Comportamento, ao longo dos anos de 2014, 2016, 2017 e 2018 (da esquerda para direita, de cima para baixo), da embocadura do CELMM.	20
Figura 3 – Batimetria do Complexo Lagunar Mundaú/Manguaba.	26
Figura 4 – Rugosidade do Complexo Estuarino Lagunar Mundaú/Manguaba.	27
Figura 5 – Curva de maré (m) utilizada na modelagem para o ano de 2014, obtida a partir das constantes harmônicas fornecidas pela DHN	28
Figura 6 – Local de medição dos dados meteorológicos (código OMM 81998).	29
Figura 7 – Rosa de distribuição do vento para o ano de 2014, estação localizada próxima a Laguna Mundaú.....	29
Figura 8 – Valores de radiação solar incidente medidos no ano de 2014.	30
Figura 9 – Valores de umidade relativa medidos no ano de 2014.....	30
Figura 10 – Valores de temperatura medidos no ano de 2014.	30
Figura 11 – Valores de altura pluviométrica para estação código 00935004 no ano de 2014 (Fonte: ANA, 2018).	31
Figura 12 – Localização das estações fluviométricas, estações 39770000 e 39870000. (ANA, 2018).	32
Figura 13 – Valores das vazões médias mensais para a estações de código 39770000 e 39870000 no período de 1978 a 2014 (ANA, 2018).	32
Figura 14 – Valores de vazão para os rios Mundáu e Paraíba do Meio, em m ³ /s, para o ano de 2014, Sistema de Informações Hidrológicas, estações 39770000 e 39870000.	33
Figura 15 – Definição do domínio de modelagem do complexo estuarino lagunar Mundaú/Manguaba, mostrando a malha com 1463 elementos finitos e 6829 nós, e a localização dos principais rios contribuintes.	34
Figura 16 – Localização das estações de medições da posição da superfície livre nas Lagunas Mundaú e Manguaba.	35

Figura 17 – Comparação entre os valores da posição da superfície livre medidos e obtidos pelo SisBaHiA® para a estação da Laguna Mundaú.	36
Figura 18 – Comparação entre os valores da posição da superfície livre medidos e obtidos pelo SisBaHiA® para a estação Manguaba.	37
Figura 19 – Relação entre os valores da posição da superfície livre medidos e obtidos pelo SisBaHiA® para a estação Mundaú.	37
Figura 20 – Relação entre os valores da posição da superfície livre medidos e obtidos pelo SisBaHiA® para a Laguna Manguaba.	38
Figura 21 – Localização das 11 estações ao longo do Complexo Estuarino Laguna Mundaú/Manguaba	40
Figura 22 – Valores da posição da superfície livre nas estações ao longo da Laguna Manguaba no intervalo de 31/01/2014 a 20/02/2014. ...	41
Figura 23 – Valores da posição da superfície livre nas estações ao longo da Laguna Mundaú no intervalo de 31/01/2014 a 20/02/2014	41
Figura 24 – Componente Leste-Oeste da velocidade (m/s) obtidas pelo SisBaHiA® nas estações da Laguna Manguaba entre 31/01/2014 e 20/02/2014.	42
Figura 25 – Componente Norte-Sul da velocidade (m/s) obtidas pelo SisBaHiA® nas estações da Laguna Manguaba entre 31/01/2014 e 20/02/2014.	43
Figura 26 – Componente Norte-Sul da velocidade (m/s) obtidas pelo SisBaHiA® nas estações da Laguna Mundaú entre 31/01/2014 e 20/02/2014.	43
Figura 27 – Valores da posição da superfície livre nas estações ao longo da Laguna Manguaba no intervalo de 27/09/2014 a 15/10/2014. ...	44
Figura 28 – Valores da posição da superfície livre nas estações ao longo da Laguna Mundaú no intervalo de 27/09/2014 a 15/10/2014.	45
Figura 29 – Componente Leste-Oeste da velocidade (m/s) obtidas pelo SisBaHiA® nas estações da Laguna Manguaba entre 27/09/2014 a 15/10/2014.	45
Figura 30 – Componente Leste-Oeste da velocidade (m/s) obtidas pelo SisBaHiA® nas estações da Laguna Mundaú entre 27/09/2014 a 15/10/2014.	46

Figura 31 – Componente Norte-Sul da velocidade (m/s) obtidas pelo SisBaHiA® nas estações da Laguna Manguaba entre 27/09/2014 a 15/10/2014.	46
Figura 32 – Componente Norte-Sul da velocidade (m/s) obtidas pelo SisBaHiA® nas estações da Laguna Mundaú entre 27/09/2014 a 15/10/2014.	47
Figura 34 – Instante final da distribuição das partículas em todo o domínio no período de estiagem no CELMM, com absorção total das partículas.....	50
Figura 35 – Instante final da distribuição das partículas em todo o domínio no período de estiagem no CELMM, com absorção nula das partículas.....	50
Figura 36 – Isolinhas do tempo de residência no período de estiagem com absorção total das partículas.	51
Figura 37 – Isolinhas do tempo de residência no período de estiagem absorção nula das partículas.	51
Figura 38 – Instante inicial da distribuição das partículas em todo o domínio no período chuvoso no CELMM.....	Erro! Indicador não definido.
Figura 39 – Instante final da distribuição das partículas em todo o domínio no período chuvoso no CELMM com absorção total das partículas.....	53
Figura 40 – Instante final da distribuição das partículas em todo o domínio no período chuvoso no CELMM com absorção nula das partículas.....	54
Figura 41 – Isolinhas do tempo de residência ao final do período chuvoso com absorção total das partículas.	54
Figura 42 – Isolinhas do tempo de residência ao final do período chuvoso com absorção nula das partículas.	55
Figura 43 – Campo de correntes residual, em m/s, obtido numericamente pelo SisBaHiA®, considerando dois ciclos de maré, em 08/02/2014.	57
Figura 44 – Campo de correntes residual, em m/s, obtido numericamente pelo SisBaHiA®, considerando dois ciclos de maré, em 15/02/2014.	58

Figura 45 – Isolinhas do campo de correntes residual, em m/s, na região dos canais, obtido numericamente pelo SisBaHiA®, considerando dois ciclos de maré de quadratura, em 15/02/2014.	59
Figura 46 – Detalhe do campo de correntes residual, na região dos canais, obtido numericamente pelo SisBaHiA®, considerando dois ciclos de maré de quadratura, em 15/02/2014.	60
Figura 47 – Detalhe do campo de correntes residual, nas regiões das Lagunas De Mundaú (acima) e Manguaba, obtido numericamente pelo SisBaHiA®, considerando dois ciclos de maré de quadratura, em 15/02/2014.	61
Figura 48 – Campo de correntes residual, em m/s, obtido numericamente pelo SisBaHiA®, considerando dois ciclos de maré, em 02/10/2014.	64
Figura 49 – Campo de correntes residual, em m/s, obtido numericamente pelo SisBaHiA®, considerando dois ciclos de maré, em 07/10/2014.	65
Figura 50 – Isolinhas do campo de correntes residual, em m/s, na região dos canais, obtido numericamente pelo SisBaHiA®, considerando dois ciclos de maré no período de quadratura, em 07/10/2014.	66
Figura 51 – Detalhe do campo de correntes residual, em m/s, na região dos canais, obtido numericamente pelo SisBaHiA®, considerando dois ciclos de maré no período de quadratura, em 07/10/2014.	67
Figura 52 – Detalhe do campo de correntes residual, na região das Lagunas, obtido numericamente pelo SisBaHiA®, considerando dois ciclos de maré no período de quadratura, em 07/10/2014.	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coordenadas das Estações de medição da posição da superfície livre nas Lagunas Mundaú e Manguaba.	35
Tabela 2 – Coordenadas das estações de medição no SisBaHiA® ao longo do Complexo Estuarino Lagunar Mundaú/Manguaba.	39

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. OBJETIVOS.....	16
2.1 OBJETIVO GERAL	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3. METODOLOGIA	17
3.1. DESCRIÇÃO DO LOCAL	17
3.2 SisBaHiA®	21
3.2.1 ESCOAMENTO RESIDUAL	23
3.2.2 TRABALHOS ANTERIORES	23
3.2.3 CÁLCULO DO TEMPO DE RESIDÊNCIA	24
4. CALIBRAÇÃO DO MODELO.....	35
5. RESULTADOS DO SisBaHiA® PARA A CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA 39	
6. RESULTADOS DO SisBaHiA® PARA O TEMPO DE RESIDÊNCIA	48
7. RESULTADOS DO SisBaHiA® PARA O ESCOAMENTO RESIDUAL.....	55
8. CONCLUSÃO	69
9. REFERÊNCIAS	71

1. INTRODUÇÃO

Historicamente, regiões costeiras são, em sua maioria, locais com alta densidade demográfica, apresentando problemas relacionados a saneamento, ocupações irregulares e exploração indevida de seus recursos. Estuários, baías e lagunas costeiras sofrem com ocupações irregulares e lançamentos de poluentes; cerca de 60% de todas as grandes metrópoles pelo mundo estão localizadas próximo a esses sistemas (Miranda et al. 2002), que proporcionam atividades lucrativas às cidades ao entorno, como por exemplo, a atividade portuária (ANA, 2006). No entanto, tais atividades causam uma pressão ambiental, influenciando o equilíbrio do ecossistema. As ações que causam maior estresse nessas regiões são o lançamento de esgoto doméstico e industrial, com a introdução de organismos patogênicos, matéria orgânica e nutrientes; o descarte de efluente com temperaturas elevadas e o aporte de sedimentos por atividades diversas (Miranda et al. 2002).

Por serem ambientes com uma dinâmica diferente de corpos hídricos continentais, sistemas costeiros têm seu processo de mistura dependente de várias forçantes, como as ações das marés, ventos, vazões provenientes das bacias contribuintes, variações de salinidade, entre outros (Mantavonelli, 2014). O uso de modelos ambientais é importante para o entendimento dos problemas relacionados a esses corpos d'água, sendo capazes de realizar diagnóstico e prognóstico, auxiliando nas tomadas de decisões. Exemplo disso é o entendimento da circulação hidrodinâmica e dos processos de misturas que, quando realizados pelos modelos ambientais, podem prevenir situações de estresse.

Um dos indicadores dos processos de mistura que pode ser calculado pelos modelos é o tempo de residência. Zimmermann (1998) define tempo de residência como o tempo de permanência de uma substância em um estuário ou laguna, antes de ser transportado para fora ou “consumido” no ambiente. Segundo Alves e Wasserman (2002), esse indicador tem um papel importante para determinar a disposição que um corpo d'água tem de depurar e/ou expulsar poluentes. Fica claro que o tempo médio de permanência é o que auxilia no

entendimento da capacidade de absorção de todas as substâncias que entram no corpo hídrico (Ambrosetti, 2003).

Outro indicador que pode ser calculado pelos modelos ambientais, referente às movimentações das massas em sistemas costeiros, é o escoamento residual, que controla a importação e exportação de constituintes, possibilitando definir regiões onde ocorre a formação de vórtices, que representam possíveis áreas de estagnação (Lopes, 2010).

Nesse contexto, o presente trabalho estuda os processos de renovação do Complexo Lagunar Mundaú/Manguaba (CELMM), localizado no estado de Alagoas, usando modelos ambientais. O complexo é formado por duas lagunas, Mundaú e Manguaba, possuindo uma área de 126 km² com profundidade média de 2,0 m e 2,5 m, respectivamente. O canal que faz a ligação do complexo lagunar com o mar possui profundidade média de 8,0 m. A sua embocadura é dinâmica, apresentando cordões de areia que migram constantemente ao longo do tempo (ANA, 2006). Os principais rios que desaguam no complexo são os rios Mundaú e Paraíba do Meio. O complexo tem fundamental importância para região, nas atividades de pesca, turismo e transporte. Interferências antrópicas acontecem devido à proximidade da capital alagoana, gerando ocupações irregulares ao entorno do sistema, descarte de efluente líquido e descarte de resíduos de todas as classes.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo estudar a circulação hidrodinâmica e suas implicações no processo de renovações do Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba (CELMM), utilizando o modelo computacional SisBaHiA®.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Implantação e simulação do modelo de circulação hidrodinâmica;
- Calibração do modelo de circulação hidrodinâmica;
- Definição dos cenários, com análise do ano de 2014 para os meses secos e chuvosos;
- Determinação do tempo de residência e do escoamento residual para os diferentes cenários;
- Definição de zonas de menor/maior sensibilidade de degradação ambiental relacionando o tempo de residência e o escoamento residual.

3. METODOLOGIA

3.1. DESCRIÇÃO DO LOCAL

As lagunas costeiras ocupam 13% das regiões costeiras no mundo, localizadas, principalmente, nas regiões tropicais e subtropicais. São forçadas pela maré, pelo aporte fluvial e pelo vento (Miranda et al., 2002). Segundo Oliveira e Kjerfve (1993), laguna costeira é um sistema marinho raso, geralmente orientado paralelo à costa, separado do oceano por uma barreira e interligado à região costeira adjacente por um ou mais canais. São classificadas, segundo a sua geomorfologia e em relação ao seu canal de ligação com o mar, em três tipos: laguna sufocada, que apresenta um longo e único canal de ligação com o oceano; laguna restrita, que se tem dois ou mais canais de ligação; e laguna vazada, apresentando diversas ligações com o mar ao longo da costa.

O Complexo Estuarino Lagunar Mundaú/Manguaba (CELMM), localizado no litoral do estado de Alagoas, entre as latitudes 9°35'S e 9°46'S e longitudes 35°44'W e 35°58'W é formado por duas lagunas, a Mundaú e a Manguaba, possuindo uma área de 126 km² (Figura 1). A Agência Nacional de Águas (ANA, 2006) classificou o Complexo Estuarino Lagunar Mundaú/Manguaba como um estuarino-lagunar sufocado, sendo constituído de uma formação geológica dividida em três subsistemas: subsistema flúvio-lagunar e suas interações rio-laguna; a laguna central; e o subsistema de canais e suas interações estuário-mar.

Os rios mais importantes, em termos de vazão, que deságuam nas lagunas de Mundaú e Manguaba são, respectivamente, o rio Mundaú e o rio Paraíba do Meio; a localização pode ser observada na Figura 1. Outros dois rios que fazem ligação com tais lagoas são: os rios Sumaúma e Remédios.

As lagunas têm, como uma de suas principais características, a formação de pequenas ilhas ao longo do trajeto que deságuam no mar. O ecossistema presente na bacia hidrográfica de contribuição do CELMM é formado por Floresta De Tabuleiros, Mata Atlântica De Encosta, Florestas Pluviais, Matas Ciliares, Mata De Restinga E Manguezal (ANA, 2006).

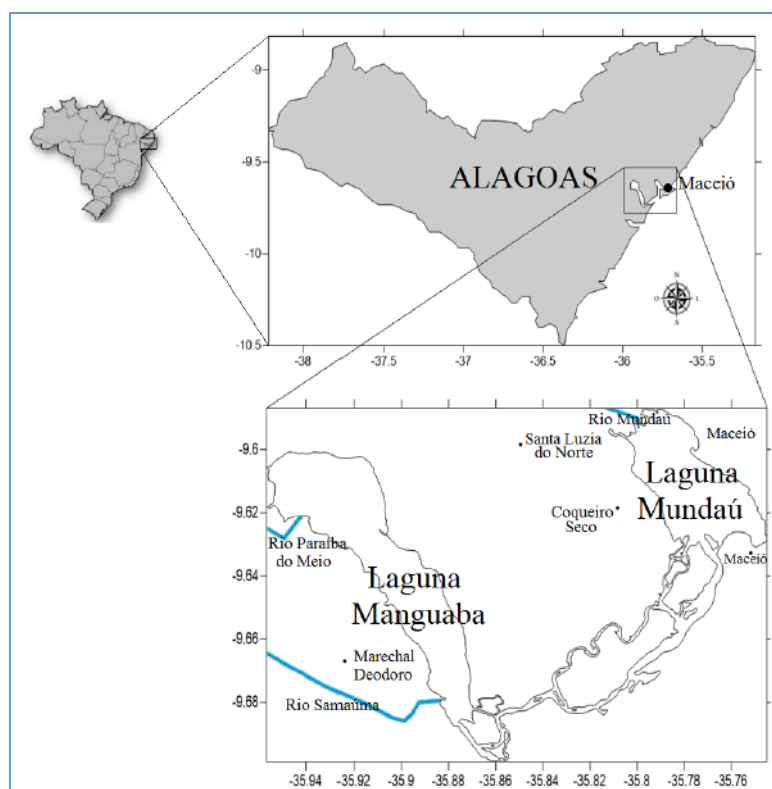


Figura 1 – Local de estudo (Lima, 2017)

A Laguna Mundaú apresenta, em suas características morfológicas de fundo, conchas, moluscos, carapaças de crustáceos e argila sílica, com uma área de aproximadamente 27,0 km², com uma profundidade que variam entre 2,0 a 7,0 metros. O principal período de chuva na região acontece no intervalo de fevereiro a julho, acumulando um total de 75% de toda a chuva anual (ANA, 2006).

Na margem direita da Laguna Mundaú fica situada a região urbana de Maceió, apresentado um alto índice de ocupações irregulares. No lado esquerdo da laguna, existe o predomínio da agricultura, destacada pelo cultivo de coco. A Laguna Manguaba tem, basicamente, suas margens ocupadas por áreas de cultivo de cana, coco e regiões de pastagens. Ao norte da lagoa, está situada a sede do município de Pilar e, ao sul, a sede do município de Marechal Deodoro.

Em relação ao saneamento básico, a situação é precária de um modo geral: a captação de esgoto do município de Maceió está em torno de 19%, com 266 km de rede coletora; cerca de 84% do que é captado é destinado ao mar a

partir de emissário submarino. Atualmente, Maceió não tem plano diretor de drenagem (PMSB, 2018).

O Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Mundaú (ANA, 2006) traz as características do Rio Mundaú e de sua bacia hidrográfica:

- Área da bacia hidrográfica de 4.126 km²;
- Altitude máxima da bacia hidrográfica de aproximadamente 1.000 m;
- Trecho principal do Rio Mundaú de 141 km;
- Declividade do Rio Mundaú de 0,0049 m/m;
- Vazão média anual máxima do Rio Mundaú de 493 m³/s;
- Vazão média anual do Rio Mundaú de 33,5 m³/s;
- Vazão média anual mínima do Rio Mundaú de 6,37 m³/s;
- Clima predominante na bacia hidrográfica é o semiárido quente, com chuvas no inverno;
- Temperatura da água do Rio Mundaú superior a 18° C;
- Evapotranspiração de 1.077-1.670 mm.

As características do Rio Paraíba do Meio e de sua bacia hidrográfica são:

- Área da bacia hidrográfica de 3.178 km²;
- Altitude máxima da bacia hidrográfica de aproximadamente de 1.000 m;
- Trecho principal do Rio Paraíba do Meio de 177 km;
- Declividade do Rio Paraíba do Meio de 0,0045 m/m;
- Vazão média anual máxima do Rio Paraíba do Meio de 325,0 m³/s;
- Vazão média anual do Rio Paraíba do Meio de 19,5 m³/s;
- Vazão média anual mínima do Rio Paraíba do Meio de 1,93 m³/s;
- Clima predominante na bacia hidrográfica é o semiárido quente, com chuvas no inverno;
- Temperatura da água do Rio Mundaú superior a 22° C;
- Evapotranspiração de 1.271 – 1.670 mm.

No que se diz respeito à embocadura do CELMM, pode-se observar na Figura 2 as constantes mudanças em relação a migração dos bancos de areia nos diferentes anos: 2006, 2014, 2017 e 2018. Tais imagens foram criadas a partir de dados dos satélites LANDSAT 5 e LANDSAT 8. No presente trabalho, a embocadura usada é referente ao ano de 2018.

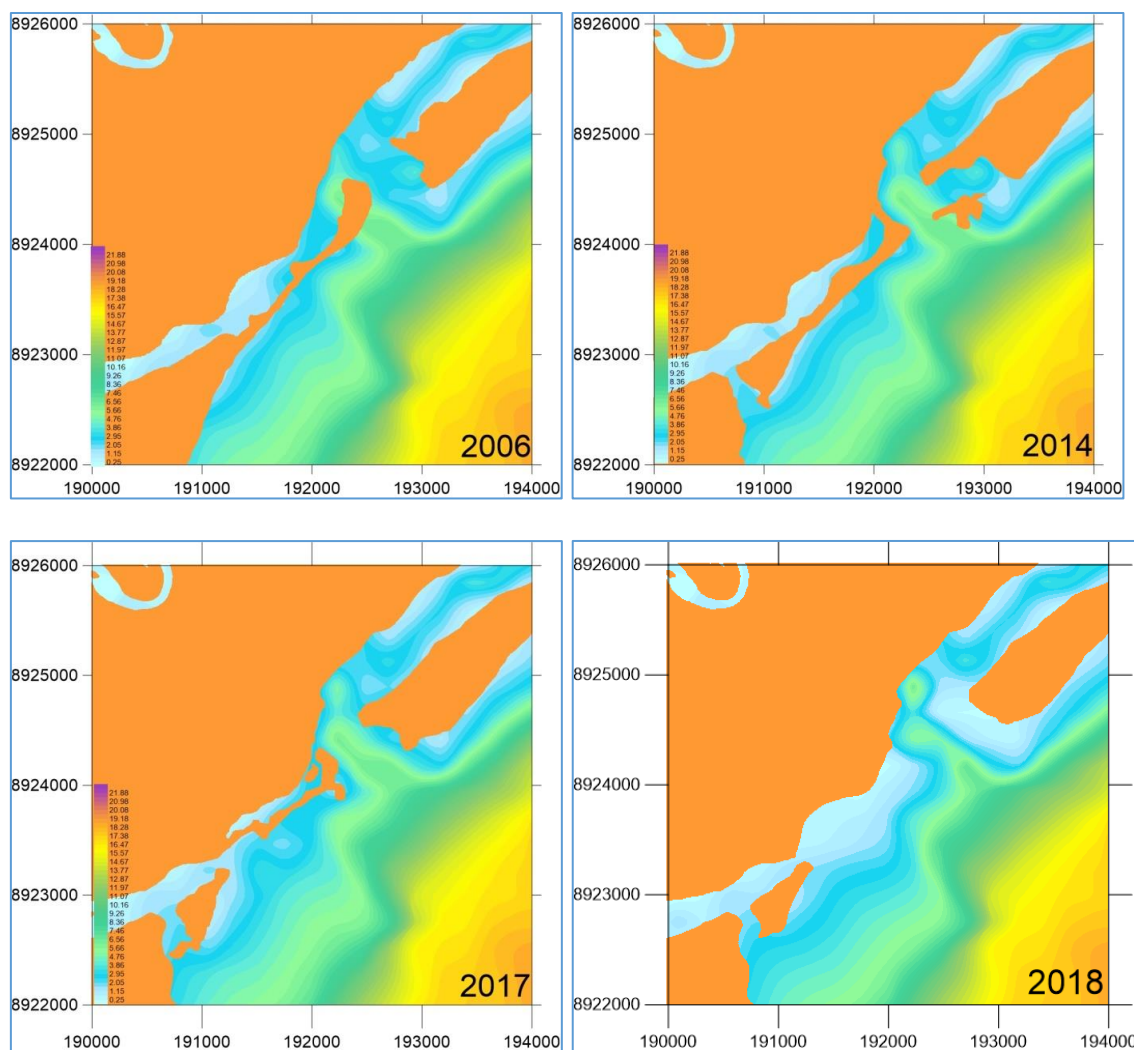


Figura 2 – Comportamento, ao longo dos anos de 2014, 2016, 2017 e 2018 (da esquerda para direita, de cima para baixo), da embocadura do CELMM.

Alguns estudos foram desenvolvidos com abordagem na modelagem ambiental na região do CELMM e estão destacados neste trabalho.

Lima (2017) fez estudos de traçadores simples no Complexo Lagunar Mundaú-Manguaba, com o software Mike 21, para o cálculo do tempo de residência, usando um modelo 2DH, desconsiderando estratificações térmicas abruptas, tratando-se de um sistema relativamente mais raso, comparado aos reservatórios. Os cenários simulados consideraram vazões diárias medidas no ano de 2016 e com vazões médias mensais no período de 1976 a 2016. Os resultados obtidos mostram um tempo de residência de 14 dias para Lagoa Mundaú e 30 dias para a Lagoa Manguaba, relatando regiões de maiores problemas ambientais no lado leste de Mundaú, devido a sua proximidade com a capital do estado, Maceió.

Lins et al. (2013) realizaram simulações hidrodinâmica no CELMM, usando o modelo IPH-ECO, objetivando respostas para determinados eventos na região. Foram utilizadas grades não estruturadas triangulares geradas pelo software JANET. As informações batimétricas foram retiradas das cartas topográficas na campanha da PORTOBRÁS/INPH (1985). Os dados hidrológicos foram no mesmo período dos dados de batimetria. A calibração do modelo foi realizada para um intervalo de sete dias. Os resultados obtidos mostraram que o CELMM é influenciado pelo regime de maré, existindo uma significativa diferença nas características do escoamento entre as marés de sizígia e quadratura.

Brito et al. (2018) estudaram, para diferentes cenários de estiagem (baixa vazão de descarga dos rios), a relação que as marés têm no processo de transporte de partículas no CELMM. Nesse estudo foi utilizado o modelo IHP-TRIM3D-PCLake com o módulo semi-implícito Euleriano-Lagrangeano com esquema de elementos finitos baseados no TRIM3D, para garantir a estabilidade, independente da celeridade. Tal estudo concluiu que as marés de sizígia foram responsáveis pela troca de água mais acentuada na Laguna Mundaú, onde as partículas, seja com a absorção ou sem absorção pelas fronteiras da laguna, ficaram com valores analisados de 54 a 64 dias.

3.2 SisBaHiA®

O SisBaHiA® – Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental –, é um sistema de modelos computacionais desenvolvidos pela COPPE/UFRJ – Instituto Aberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, que simula a circulação hidrodinâmica, o transporte de substâncias e a qualidade da água em corpos rasos.

O SisBaHiA® dispõe de vários modelos que já foram utilizados em diversos trabalhos acadêmicos e projetos. Os modelos são: Modelo de Circulação Hidrodinâmica Tridimensional e Bidimensional, Modelos de Transporte Euleriano, Modelo de Transporte Lagrangeano, Modelo de Campo Próximo para Emissários e Fontes Pontuais, modelos de Transporte de Sedimentos Coesivos e Não Coesivos e Evolução Morfológica do Fundo, Modelo de Qualidade da Água e Eutrofização, Modelo de Propagação de Ondas,

Modelos de Geração de Ondas, Modelos de Análise & Previsão de Marés (ROSMAN, 2019).

O presente trabalho calcula, a partir do modelo bidimensional de circulação hidrodinâmica do SisBaHiA[®], os padrões de circulação hidrodinâmico e o escoamento residual. Posteriormente, para o cálculo do tempo de residência do CELMM, foi utilizado o modelo Lagrangeano de transporte, também do SisBaHiA[®].

Os padrões de circulação em lagunas e sistemas costeiros são influenciados pelas três principais forças motrizes: o aporte fluvial, as marés e da ação do vento (Mantovanelli et al., 2014). As correntes de maré podem ter fluxos dominantes de enchentes ou vazantes, relacionado com o gradiente horizontal do nível de água e da morfologia da região de escoamento (Lopes, 2010).

Outra forçante que atua em sistemas costeiros é a diferença de salinidade e temperatura e, segundo Kjerfve et al. (1989), atua no movimento das massas d'águas, referentes a estratificação vertical. No entanto, lagunas são corpos tipicamente rasos e a ação do vento conduz a homogeneidade da estratificação vertical nesses sistemas. A estratificação horizontal é mais comumente encontrada nesses sistemas, contribuindo mais diretamente na circulação das massas de águas.

Como as profundidades locais do CELMM são pequenas e os padrões de estratificação são muito fracos, podem ser representadas as velocidades de correntes como médias nas verticais, sendo as equações governantes de conservação de quantidade de movimento e massas integradas na vertical. A simplificação também se deve ao fato das escalas horizontais serem pelo menos duas ordens de grandezas maiores que as escalas verticais, e o escoamento de interesse ser predominantemente horizontal (Larsson et al., 2014).

No CELMM foram usados, no modelo de circulação hidrodinâmico, a curva de maré como condição de contorno da fronteira aberta; valores de vazão dos rios Mundaú e Paraíba do Meio, como condição de contorno para a fronteira de terra.

3.2.1 ESCOAMENTO RESIDUAL

O campo de velocidade residual no SisBaHiA® é definido pela integral ao longo de um período de tempo do produto da altura de coluna d'água, com componentes das velocidades na direção x e y . A equação que define os campos de velocidade residual é:

$$U_R = \frac{\int_{t_0}^{t_0+T} (HU) dt}{\int_{t_0}^{t_0+T} H dt}, V_R = \frac{\int_{t_0}^{t_0+T} (HV) dt}{\int_{t_0}^{t_0+T} H dt} \quad (1)$$

Onde U_R e V_R são as componentes da velocidade residual nas direções x e y , U e V são componentes da velocidade promediada na direção vertical nas direções x e y , H é a altura da coluna de água, t_0 é o instante inicial e T é o período.

3.2.2 TRABALHOS ANTERIORES

Para maior entendimento das aplicações do SisBaHiA®, outros estudos foram desenvolvidos usando os cálculos de diversos indicadores ambientais em sistemas costeiros, os quais são apresentados a seguir.

Dalazen (2017) reportou estudos sobre a Baía de Paranaguá, estimando o escoamento residual, a idade da água e taxa de renovação, utilizando o SisBaHiA®. Foram utilizados os modelos hidrodinâmicos, calibrados com os dados medidos, mostrando que as vazões fluviais têm a maior importância na renovação das águas nas regiões próximas as saídas dos rios, relatando duas regiões de estagnação: a região da Baía dos Pinheiros e a região da Baía de Paranaguá.

Roversi (2012) realizou o estudo da circulação hidrodinâmica e de renovação das águas do sistema estuarino de Santos utilizando o SisBaHiA®, calibrando o modelo, proporcionando uma base para os modelos Euleriano e Lagrangeano, usados para calcular a taxa de renovação e o tempo de residência. Obtiveram resultados que, no canal de Santos, o tempo de residência varia de 40 a 70 dias, entre a embocadura do canal e o final do Canal de Piaçaguera.

Outro resultado importante é que mais de 10% das águas são renovadas no período de 15 dias causada pelo efeito das marés.

Junior (2018) estudou com o SisBaHiA® os efeitos da variação sazonal da população sobre a qualidade da água na Baía de Guaratuba/PR, voltado para o cultivo de ostras, onde os cenários foram modelados no período de verão e inverno com tempos de caimento de 6 a 12 horas. Os resultados mostraram que as plumas de verão foram maiores que as de inverno, devido ao aumento da população que ocorre nessas épocas. Em todos os cenários, as regiões de cultivos de ostras se mantiveram dentro dos padrões exigidos pela legislação.

Ponte (2018) realizou estudos referentes a análise da taxa de renovação e idade da água do sistema estuarino da Baía de Guanabara, em que foi utilizado o SisBaHiA® para os períodos de verão de inverno, com enfoque na renovação de maré pela descarga fluvial. Os resultados mostram que, após 90 dias, a água da Baía de Guanabara não se encontra renovada, com massas de idade de água de até 110 dias dentro do sistema estudado.

3.2.3 CÁLCULO DO TEMPO DE RESIDÊNCIA

O modelo Lagrangeano do SisBaHiA® é usado neste trabalho para o cálculo do tempo de residência que, nesta abordagem, é uma função local que varia no espaço. Entretanto, existem duas abordagens que podem ser feitas dentro do modelo, sendo elas:

- Uma primeira abordagem seria analisar a renovação da água, computando diretamente as Taxas de Renovação de Água em diferentes pontos, ao longo do tempo;
- Uma segunda abordagem para os resultados de permanência da água em diferentes setores, enumerando diferentes pontos do longo do tempo no domínio estudado.

O modelo utilizado nesse estudo é o Modelo de Transporte Lagrangeano, que é implementado segundo as etapas (Rosman, 2019):

1. Definição da área de inserção das partículas dentro do domínio no tempo igual a zero;

2. Definir o espaçamento entre as partículas e, conseqüentemente, a quantidade de partículas, representando a condição inicial do modelo;
3. O acompanhamento dessas partículas a cada intervalo de tempo, calculando o tempo, em relação ao nascimento, em que saem da região imposta anteriormente.

Os diferentes ciclos de maré ao longo dos períodos têm fundamental importância em relação aos valores de tempo de residência em lagunas, caracterizando o comportamento de importação ou exportação de partículas no sistema.

Nessa parte da modelagem será imposta diferentes situações para o cálculo do tempo de residência, variando o coeficiente de absorção das fronteiras com valores de um e zero para as lagunas (absorção total e absorção nula, respectivamente).

3.3. DADOS USADOS PELOS MODELOS

Primeiramente, o modelo de circulação hidrodinâmico foi calibrado com os dados medidos da posição da superfície livre por Brito et al. (2018), no intervalo de tempo de 15/02/2014 a 24/02/2014. Posteriormente foi implementada a modelagem da circulação hidrodinâmica do CELMM, considerando o ano de 2014, pela disponibilidade de dados. O período de simulação foi de um ano, de 01/01/2014 a 31/12/2014. Em seguida, os resultados do modelo de circulação hidrodinâmico foram a base para o modelo de transporte Lagrangeano, simulado para o período de 2014. Os dados usados são apresentados a seguir.

A batimetria do CELMM, apresentada na Figura 3, foi obtida a partir das cartas náuticas da DHN (Diretoria de Hidrografia e Navegação) nº 910 – Porto de Maceió, escala 1:17500, das campanhas de medição da ANA em 2014 para o interior da Laguna Mundaú e das campanhas da PORTOBRAS em 1984, no interior da Laguna Manguaba. É possível observar pela que as lagunas são rasas com valores que não ultrapassam 3 metros de profundidades e que os canais

que apresentam os maiores valores dentro do CELMM. Na região costeira é possível observar a presença da linha de corais que existe na região.

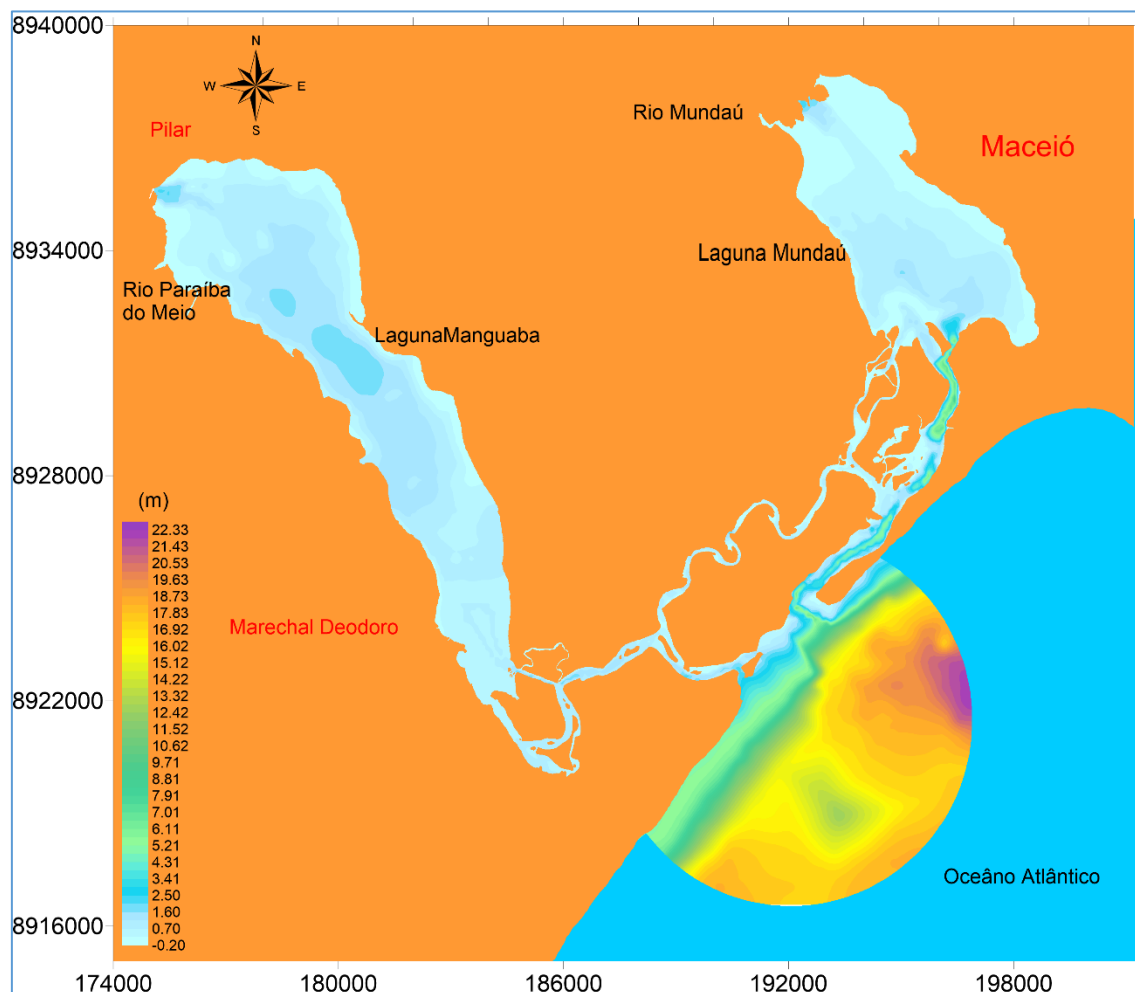


Figura 3 – Batimetria do Complexo Lagunar Mundaú/Manguaba.

O coeficiente de atrito do fundo do SisBaHiA® é calculado a partir do coeficiente de Chèzy, que depende da amplitude da rugosidade equivalente de fundo, determinada a partir da composição e da distribuição de sedimentos no fundo. Os valores de amplitude de rugosidade do fundo (ξ) para o CELMM, que podem ser observados na Figura 4, foram retirados de Alves (2010). É possível observar que o leito das Lagoas Mundaú e Manguaba é predominantemente composto por argilas ($\xi = 0.003$ m), os canais têm predomínio de areias médias ($\xi = 0,025$ m); observa-se, ainda, bancos de areia predominantemente grossa ($\xi = 0,045$ m) na região costeira adjacente.

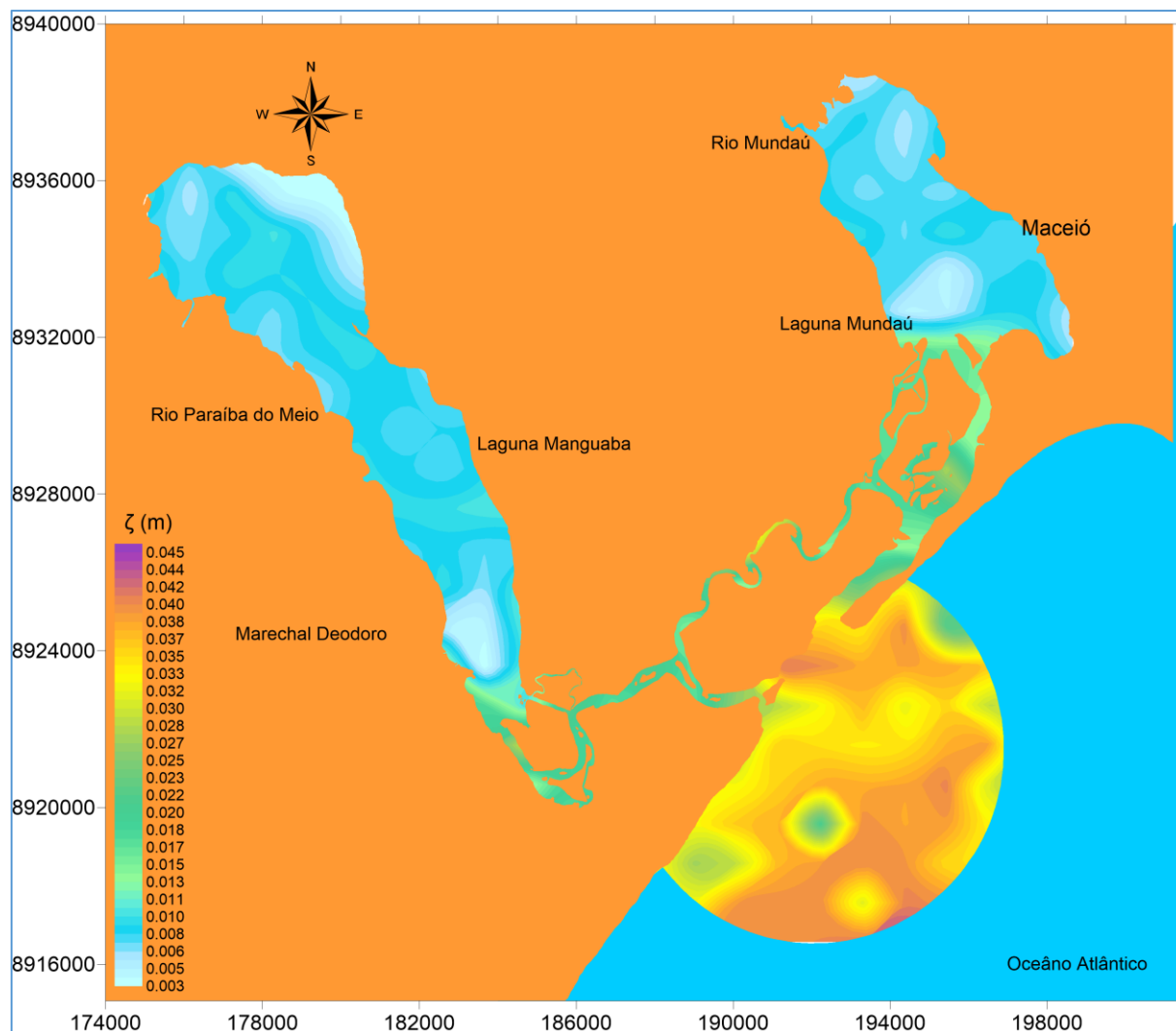


Figura 4 – Rugosidade do Complexo Estuarino Lagunar Mundaú/Manguaba.

Na simulação do padrão de circulação hidrodinâmica foi considerada a maré astronômica, obtida a partir das constantes harmônicas fornecidas pela DHN (Diretoria de Hidrografia e Navegação) para o porto de Maceió, como o principal forçante. O CELMM apresenta um regime de marés semi-diurno; a Figura 5 mostra a curva de maré para o período de simulação, 01/01/2014 a 31/12/2014. Analisando a curva de maré prevista, é possível observar um comportamento semelhante ao longo do ano, com os ciclos de sizígia e quadratura, com uma amplitude máxima de 2.55 m e altura de maré máxima de 1.29 m. A imposição da curva de maré é feita ao longo dos contornos abertos do domínio modelado.

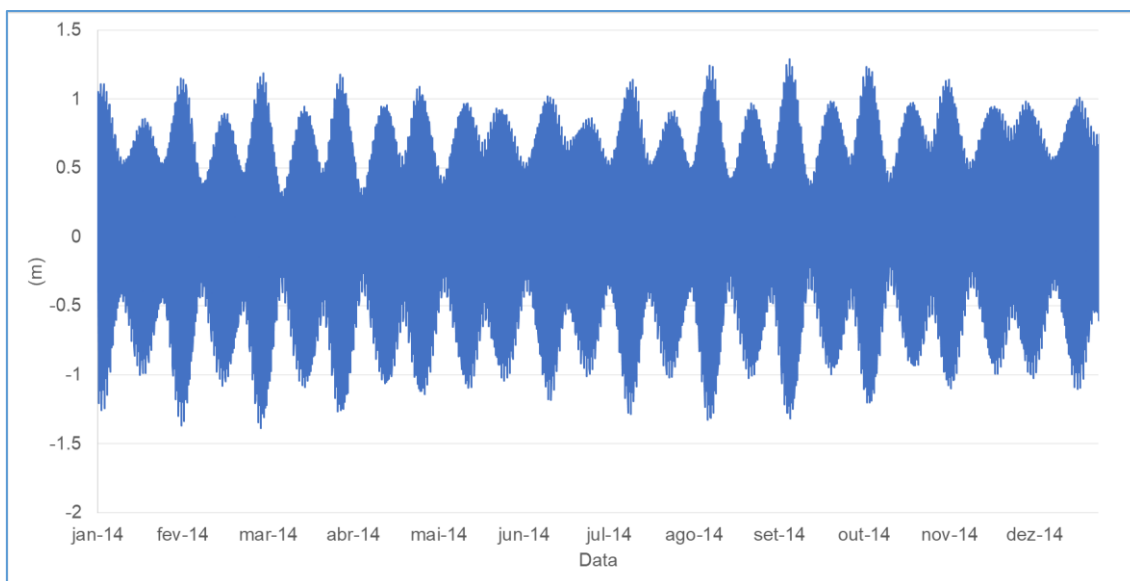


Figura 5 – Curva de maré (m) utilizada na modelagem para o ano de 2014, obtida a partir das constantes harmônicas fornecidas pela DHN

Os dados de vento foram medidos em uma estação localizada próxima à Laguna Mundaú, com coordenadas 9°33'04.2"S e 35°46'12.7"W, sendo a localização da estação Maceió-A303 (código OMM 81998) apresentada na Figura 6. Foram fornecidos ao modelo dados horários de intensidade e direção do vento para o ano de 2014. A Figura 7 apresenta a rosa de distribuição dos ventos para o ano de 2014, mostrando a predominância de ventos com intensidade inferior a 5.0 m/s. A velocidade média durante o período é de 2.6 m/s, com predominância do vento de leste/sudeste.

Os dados de temperatura, radiação solar e umidade foram obtidos na mesma estação dos dados de vento (código OMM 81998); tais informações foram fornecidas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). As Figuras 8 a 10 representam os valores medidos a cada hora dos parâmetros citados. É possível observar que a radiação tem seus menores valores nos meses de maior chuva; esses meses apresentam os maiores valores de umidade relativa para a região. A temperatura da região mostra um comportamento com pouca variação anual, com valores dentro do intervalo de 20 a 35 °C.

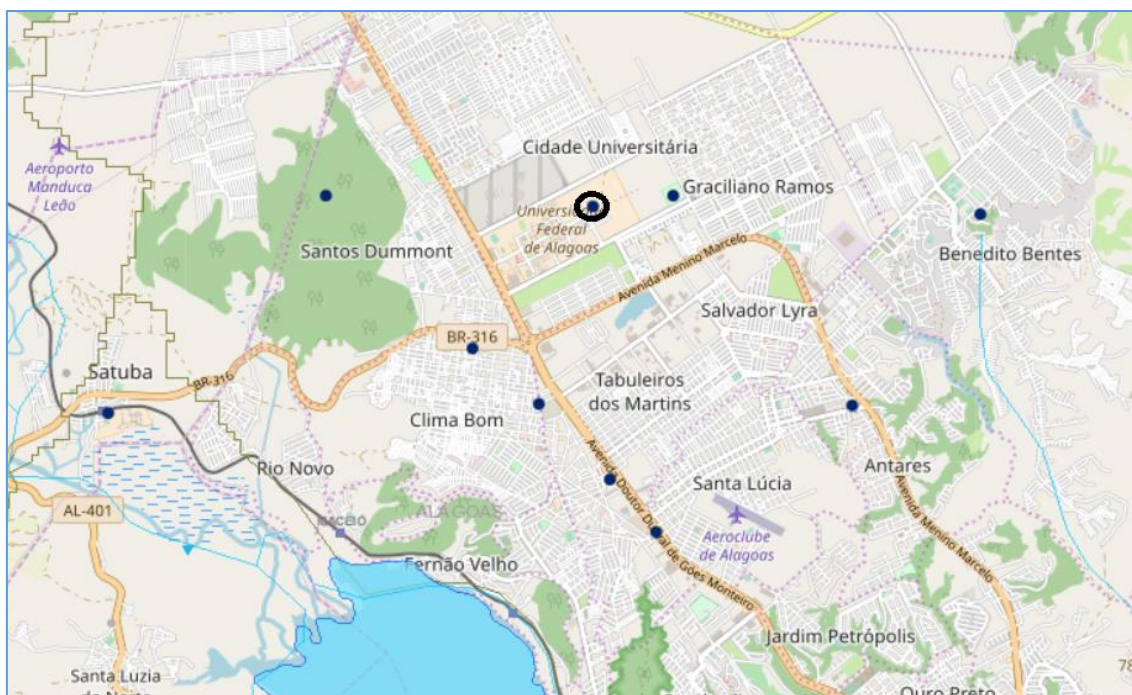


Figura 6 – Local de medição dos dados meteorológicos (código OMM 81998).

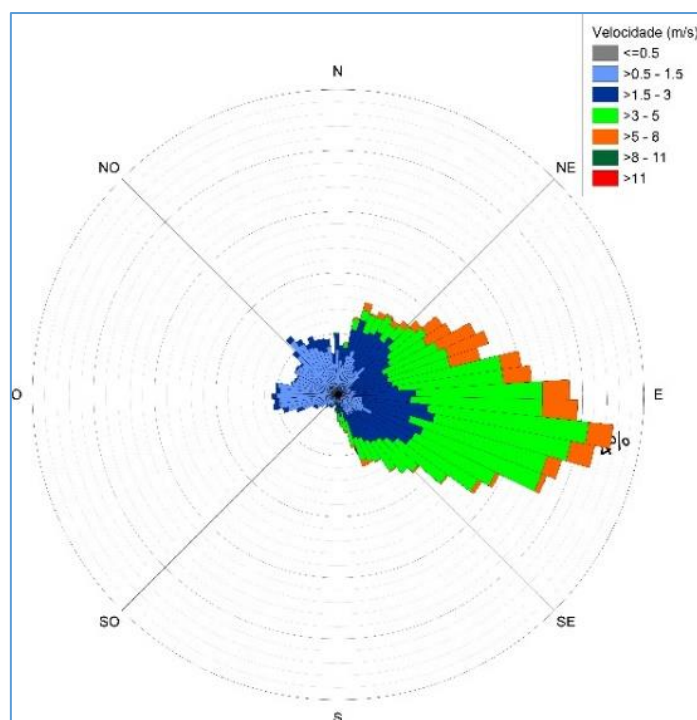


Figura 7 – Rosa de distribuição do vento para o ano de 2014, estação localizada próxima a Laguna Mundaú.

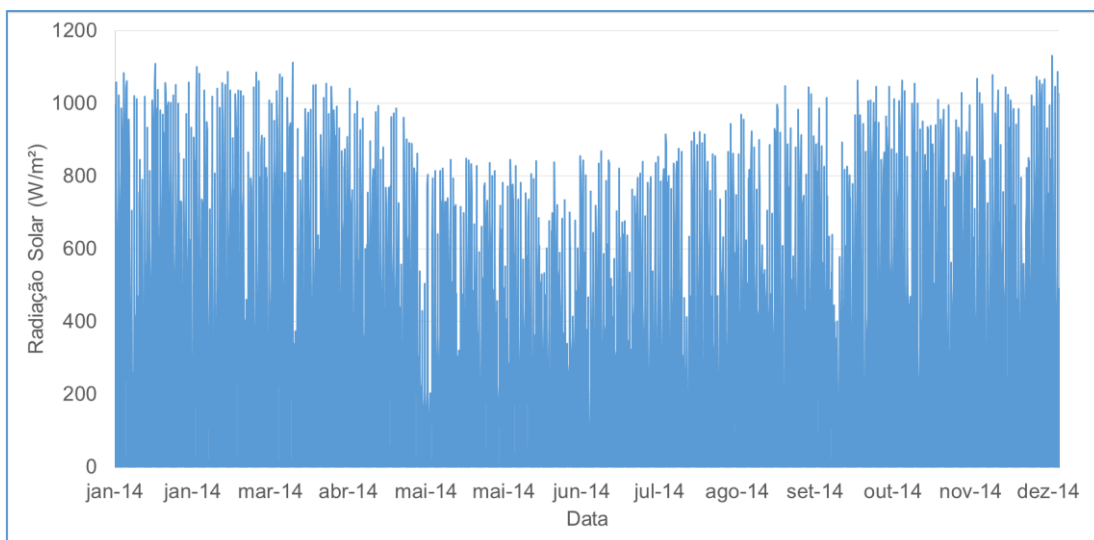


Figura 8 – Valores de radiação solar incidente medidos no ano de 2014.

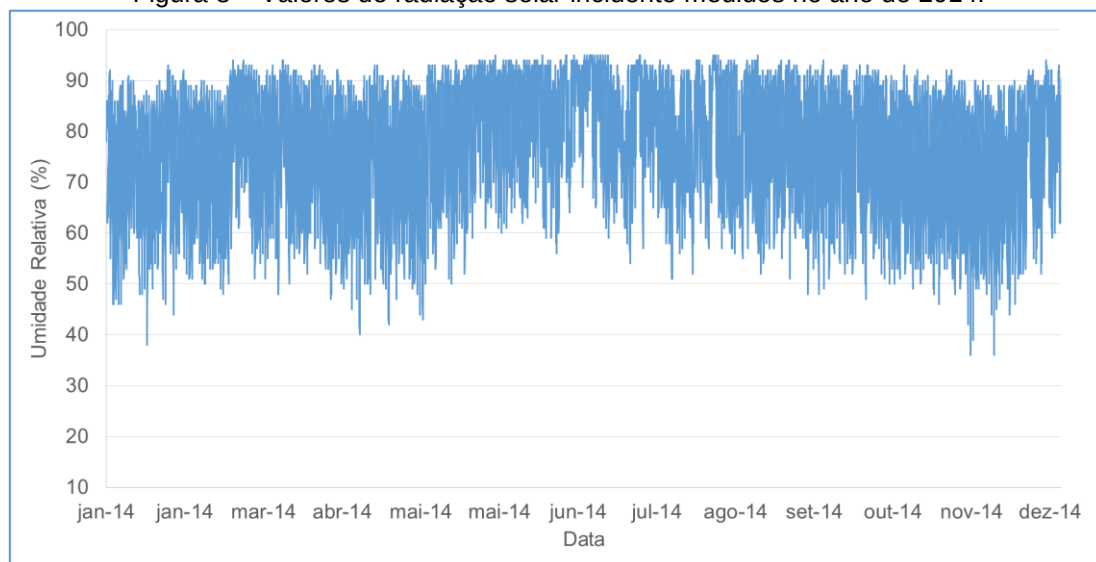


Figura 9 – Valores de umidade relativa medidos no ano de 2014.

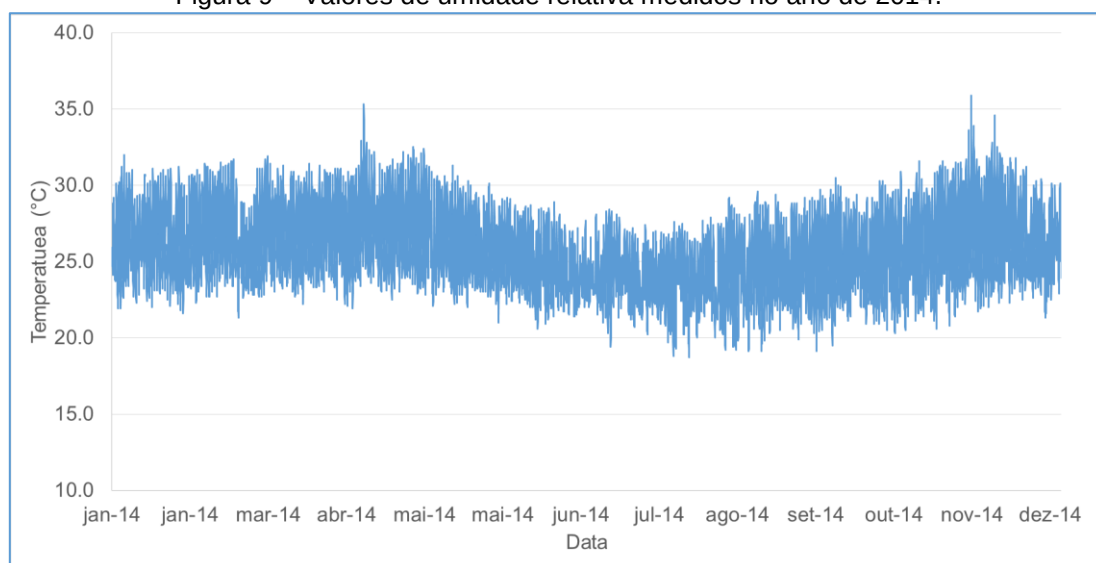


Figura 10 – Valores de temperatura medidos no ano de 2014.

O período principal de chuva na região acontece no intervalo entre fevereiro e julho, acumulando um total de 75% de toda a chuva anual (ANA, 2006), como mostra os dados medidos na estação pluviométrica, mesma estação EM que os outros dados apresentados anteriormente de radiação, umidade relativa e temperatura (código OMM 81998). Os dados disponíveis para o ano de 2014 (Figura 11) mostram dois picos, um em abril e outro em outubro, caracterizando um fenômeno pouco comum em relação aos dados históricos.

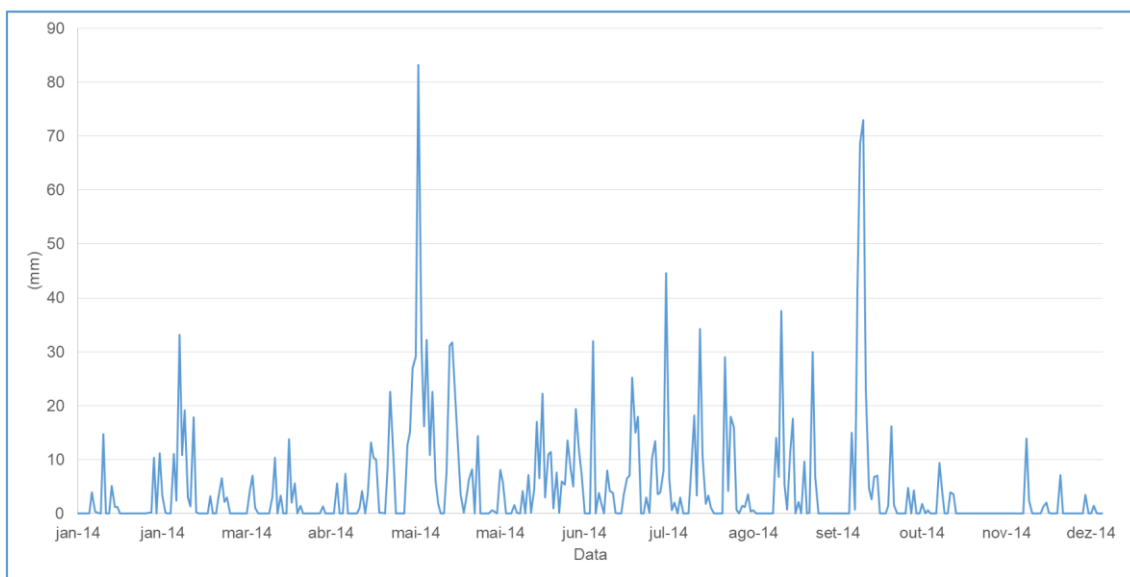


Figura 11 – Valores de altura pluviométrica para estação código 00935004 no ano de 2014 (Fonte: ANA, 2018).

Para os dados fluviométricos foram escolhidas duas estações no Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), de código 39770000 e 39870000, para os rios Mundaú e Paraíba do Meio, respectivamente, com a localização mostrada na Figura 12. Essas estações apresentaram os melhores dados, com poucas falhas. Tais estações apresentam dados do período de 1978 a 2014; os valores das médias mensais estão apresentados na Figura 13 para o rio Mundaú e para o rio Paraíba do Meio.

É possível observar, na Figura 14, as vazões medidas no rio Mundaú e do rio Paraíba do Meio para o ano de 2014; os dados medidos apresentam um comportamento diferente em relação a valores das médias históricas apresentadas, com vazões elevadas no período seco (outubro). Nos primeiros meses do ano, as vazões são muito baixas, elevando-se em curtos períodos. Pode-se notar que os picos de vazão estão diretamente relacionados com os picos de pluviosidade.

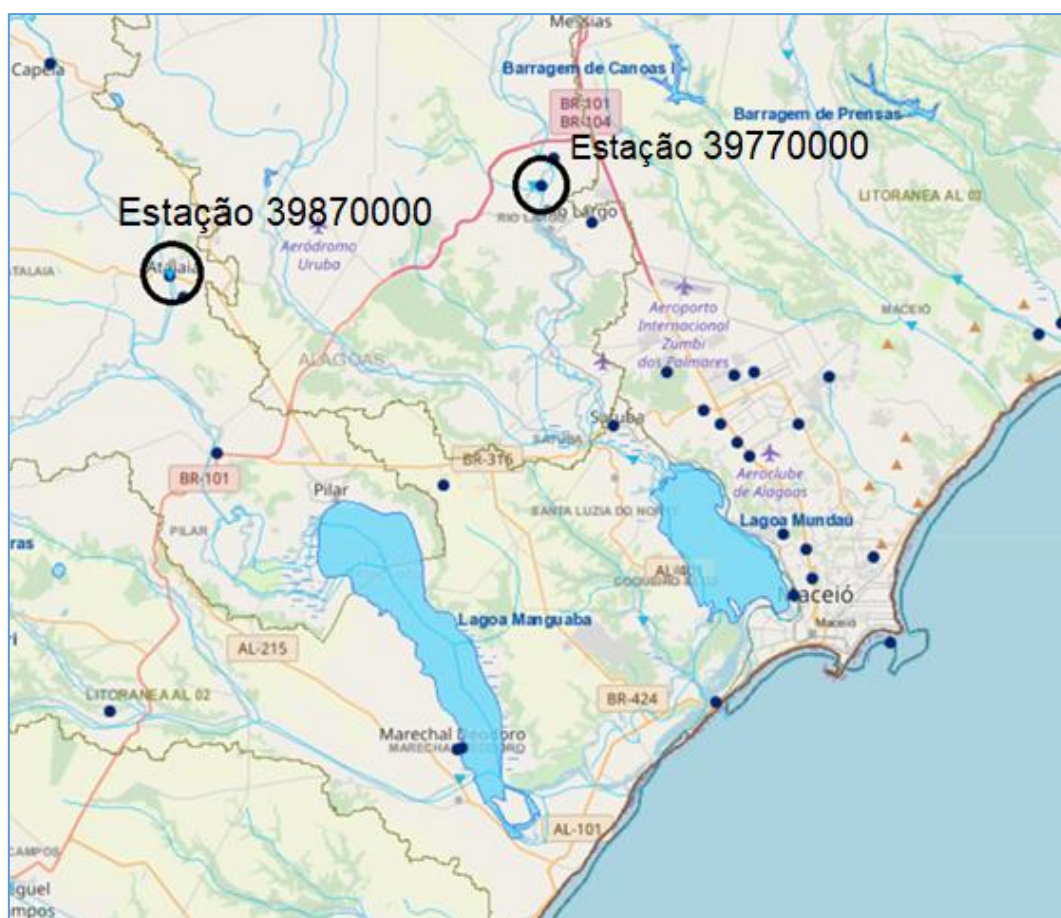


Figura 12 – Localização das estações fluviométricas, estações 39770000 e 39870000. (ANA, 2018).

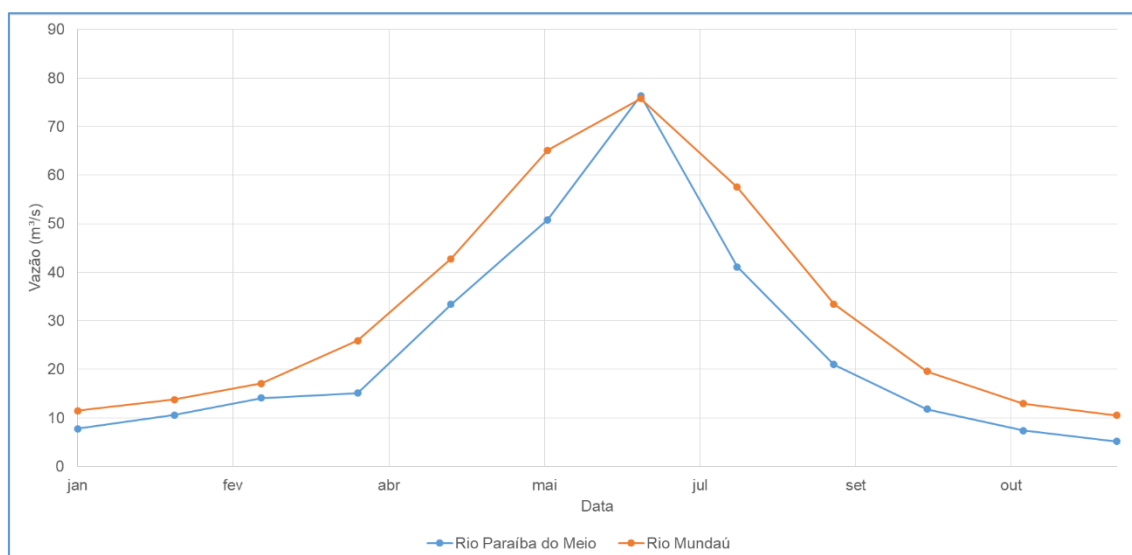


Figura 13 – Valores das vazões médias mensais para a estações de código 39770000 e 39870000 no período de 1978 a 2014 (ANA, 2018).

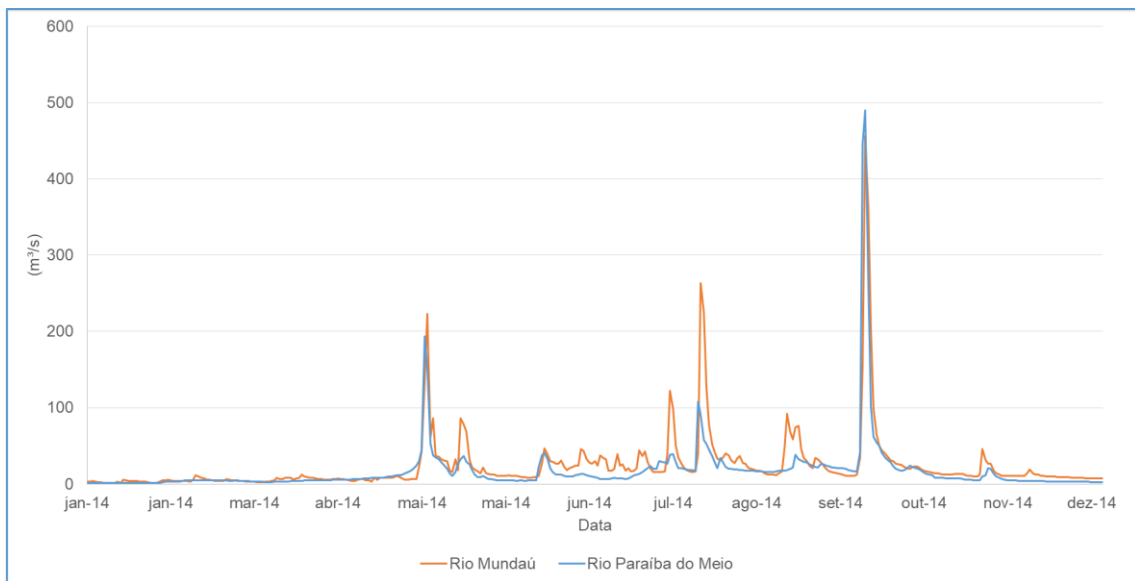


Figura 14 – Valores de vazão para os rios Mundáu e Paraíba do Meio, em m^3/s , para o ano de 2014, Sistema de Informações Hidrológicas, estações 39770000 e 39870000.

Considerando que o interesse do estudo é a caracterização da circulação hidrodinâmica dentro do CELMM, o domínio definido para o estudo compreende as lagunas, os canais e uma extensão na região costeira adjacente, mostrado na Figura 15, onde também pode ser observada a malha de elementos finitos quadráticos, com 1463 elementos finitos e 6829 nós, usada na discretização do domínio e a localização dos rios principais.

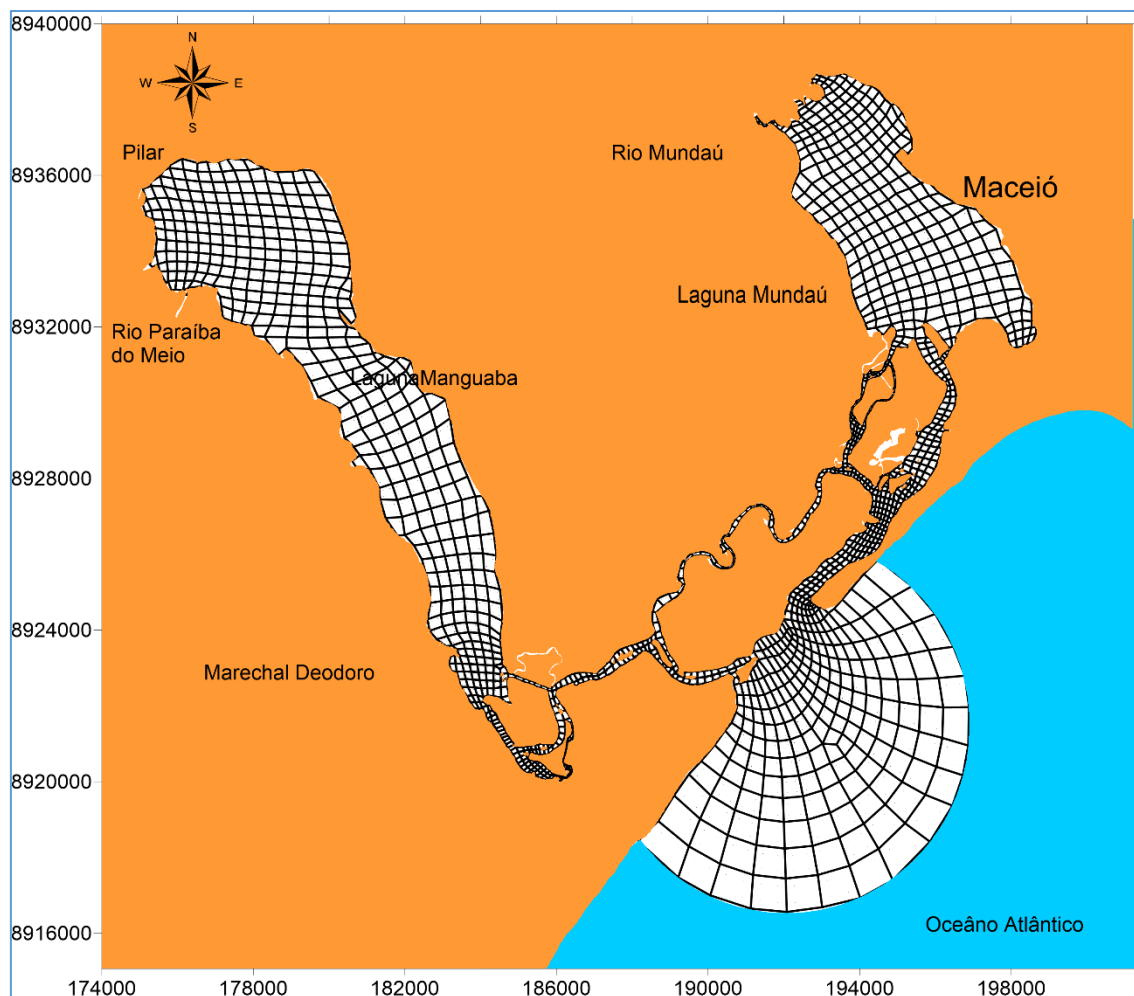


Figura 15 – Definição do domínio de modelagem do complexo estuarino lagunar Mundaú/Manguaba, mostrando a malha com 1463 elementos finitos e 6829 nós, e a localização dos principais rios contribuintes.

É necessário impor condições de contorno adequadas para que o modelo hidrodinâmico tenha solução única. Para condições de contorno para a fronteira aberta, foram inseridos os valores da posição da superfície livre obtidas a partir da curva de maré. Para as condições de contorno da parte terrestre é necessário definir os nós que receberam os dados da vazão fluvial, sendo os valores de vazão dos rios Mundaú e Paraíba do Meio, onde as velocidades normais são calculadas e as velocidades tangenciais são nulas. Para os outros nós da fronteira terrestre são definidas as velocidades normais como zero e as velocidades tangenciais calculadas pelo modelo hidrodinâmico.

4. CALIBRAÇÃO DO MODELO

Para a calibração do modelo hidrodinâmico foram comparados dados da posição da superfície livre, medidos e obtidos em Brito et al (2018), no período de 15/02/2014 a 24/02/2014 em duas estações, no lado leste da Laguna Mundaú e no lado oeste da Laguna Manguaba; as coordenadas das estações ficam descritas na Tabela 1 e representadas na Figura 16.



Figura 16 – Localização das estações de medições da posição da superfície livre nas Lagunas Mundaú e Manguaba.

Tabela 1 – Coordenadas das Estações de medição da posição da superfície livre nas Lagunas Mundaú e Manguaba.

Estação (UTM)	Coordenada X (m)	Coordenada Y (m)
Manguaba	182645	8924413
Mundaú	193759	8933821

As Figuras 17 e 18 mostram a comparação entre os resultados da posição da superfície livre obtidos pelo SisBaHiA[®], com os dados medidos nas Lagunas Mundaú e Manguaba, respectivamente. É possível observar uma boa concordância em relação à fase, porém, diferenças de amplitude podem ser observadas. Possivelmente, o canal de ligação, responsável pelo amortecimento da onda não está corretamente modelado. Certamente problemas com a

definição da batimetria e da rugosidade de fundo podem gerar um amortecimento maior ou menor da onda de maré que atravessa o canal. Outro fator proeminente na não concordância com os dados medidos é a utilização da embocadura de 2018 com os dados de 2014, gerando assim um amortecimento diferente em relação aos dados modelados. Seguramente, levantamentos de campo para a correta definição desses dados são necessários para garantir a acurácia do modelo.

As Figuras 19 e 20 mostram os valores do coeficiente de correlação entre os dados medidos com os dados obtidos pelo SisBaHiA®. Para a Laguna Mundaú o valor obtido de 0.94, mostrando que a calibração do modelo para a Laguna Mundaú está de acordo com os dados medidos; Brito et al. (2018) obteve o valor de 0.95 para o mesmo conjunto de dados. Para a Laguna Manguabao valor do coeficiente é de 0.68, valor bem abaixo do que obtido para a Laguna Mundaú, mostrando que a batimetria usada, dos anos 80, possivelmente deve ter provocado esta diminuição na acurácia. Rosman (2018) avalia que uma boa concordância entre os dados medidos e os dados modelados para medição dos valores da superfície livre é de 90%.

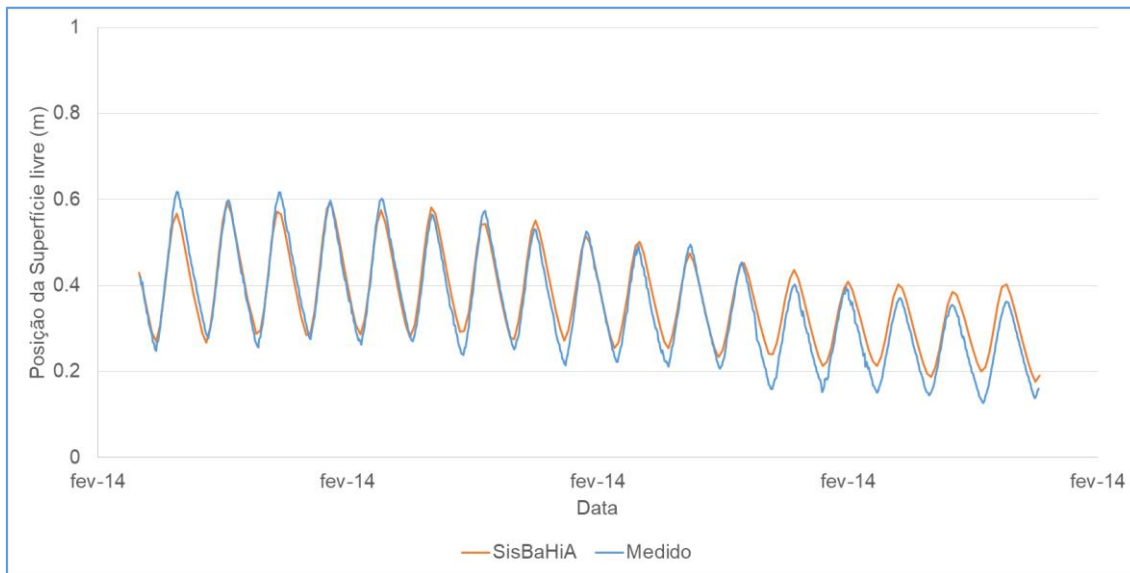


Figura 17 – Comparação entre os valores da posição da superfície livre medidos e obtidos pelo SisBaHiA® para a estação da Laguna Mundaú.

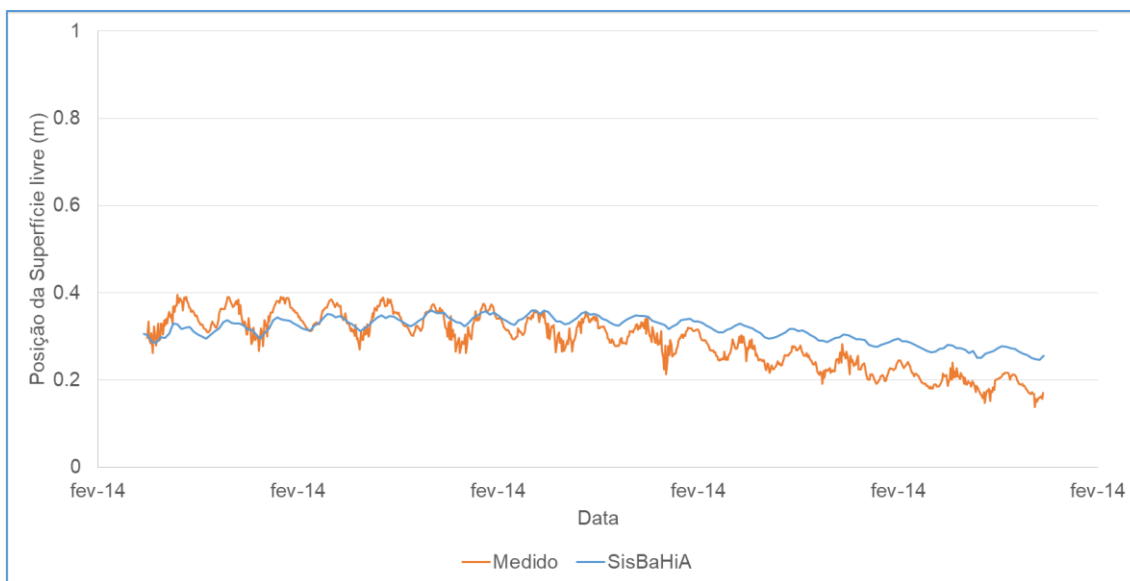


Figura 18 – Comparação entre os valores da posição da superfície livre medidos e obtidos pelo SisBaHiA® para a estação Manguaba.

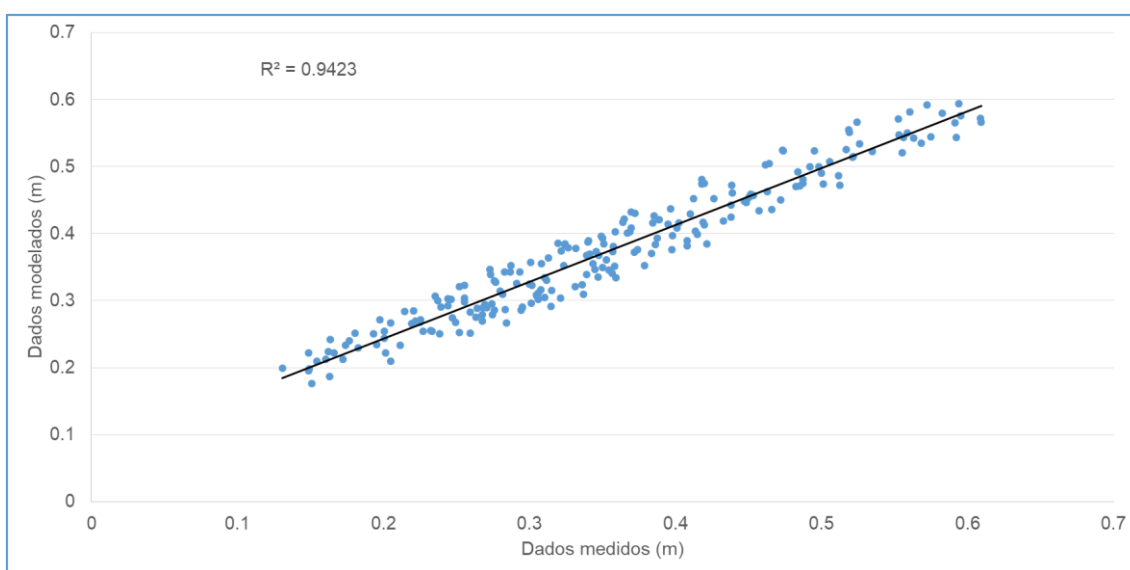


Figura 19 – Relação entre os valores da posição da superfície livre medidos e obtidos pelo SisBaHiA® para a estação Mundaú.

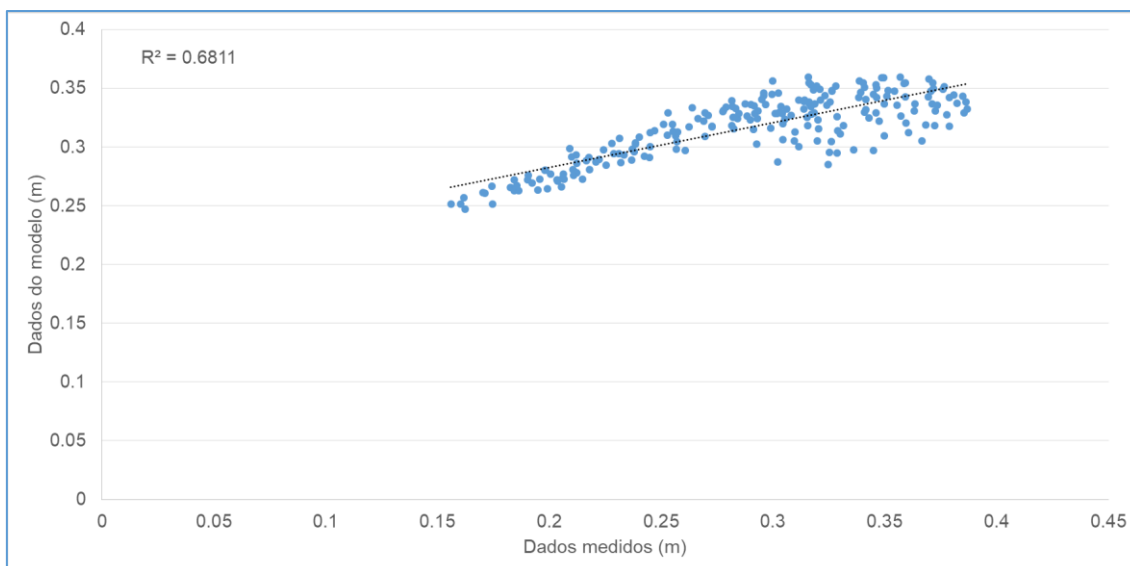


Figura 20 – Relação entre os valores da posição da superfície livre medidos e obtidos pelo SisBaHiA® para a Laguna Manguaba.

Após a calibração do modelo hidrodinâmico, foi possível definir os cenários para diferentes situações de circulação hidrodinâmica. Os cenários foram escolhidos considerando os períodos de estiagem e períodos chuvosos para a região do CELMM, abrangendo marés de sizígia e quadratura. Vale ressaltar que, para o período chuvoso, foram propostas as datas onde aconteceram os picos de vazões no mês de outubro.

Para o modelo hidrodinâmico ficou definido o cenário de estiagem o intervalo entre 31/01/2014 a 20/02/2014 e, para o período chuvoso, 27/09/2014 a 15/10/2014.

Para o modelo Lagrangeano ficaram definidas as datas de 15/01/2014 a 15/04/2014, para o período de estiagem e, para o período de chuvoso, o intervalo entre 15/08/2014 a 15/11/2014.

Os cálculos do escoamento residual foram feitos para um período de 24 horas, nas datas 08/02/2014 e 15/02/2014, respectivamente para marés de sizígia e quadratura, em um período de estiagem. Para o período chuvoso ficaram definidos os dias de 02/10/2014 e 07/10/2014, sendo respectivamente sizígia e quadratura.

5. RESULTADOS DO SisBaHiA® PARA A CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA

A variação dos valores da posição da superfície livre obtidos pelo SisBaHiA® no Complexo Estuarino Lagunar Mundaú/Manguaba é analisado em 11 estações ao longo das Lagunas e nos canais, para os períodos de estiagem e chuvoso. A Tabela 2 apresenta as coordenadas das estações; a Figura 21 apresenta a localização das estações.

Tabela 2 – Coordenadas das estações de medição no SisBaHiA® ao longo Complexo Estuarino Lagunar Mundaú/Manguaba.

Estação	Coordenada X	Coordenada Y
Manguaba 1	190012.13	8922787.7
Manguaba 2	187007.527	8922837.533
Manguaba 3	183050.9575	8926605.2
Manguaba 4	179436.39	8932000.6
Manguaba 5	176718.0475	8935965
Mar 1	195105.4975	8918239.05
Mar 2	192307.37	8922273.3
Mundaú 1	192711.1475	8925352.95
Mundaú 2	195789.96	8928332.1
Mundaú 3	195419.41	8933720.5
Mundaú 4	192919.405	8937386.5

As Figura 22 e 23 mostram os valores da posição da superfície livre obtidos pelo SisBaHiA® ao longo do período de estiagem, definido no intervalo de 31/01/2014 a 20/02/2014 para Laguna Manguaba e Mundaú, respectivamente.

Na região mais interior das Lagunas, as oscilações da superfície livre são bem menores em comparação com a região dos canais. Na Laguna Manguaba, por apresentar um canal mais raso, o prisma de maré é menor em

comparação ao volume da Laguna Mundaú, mostrando uma menor variação na amplitude nos valores da superfície livre. Tal resultado evidencia um amortecimento por parte dos canais em relação a onda de maré, onde as estações mais no interior da Laguna Manguaba (estações Manguaba 5, 4 e 3) quase não apresentam oscilações, mostrando Também uma severa perda de carga nos canais. Os maiores valores da altura de maré ocorreram nas estações Mundaú 1 e Manguaba 1 no período de sizígia chegando a 1,00 m e, no período de quadratura chegando a 0,50 m.

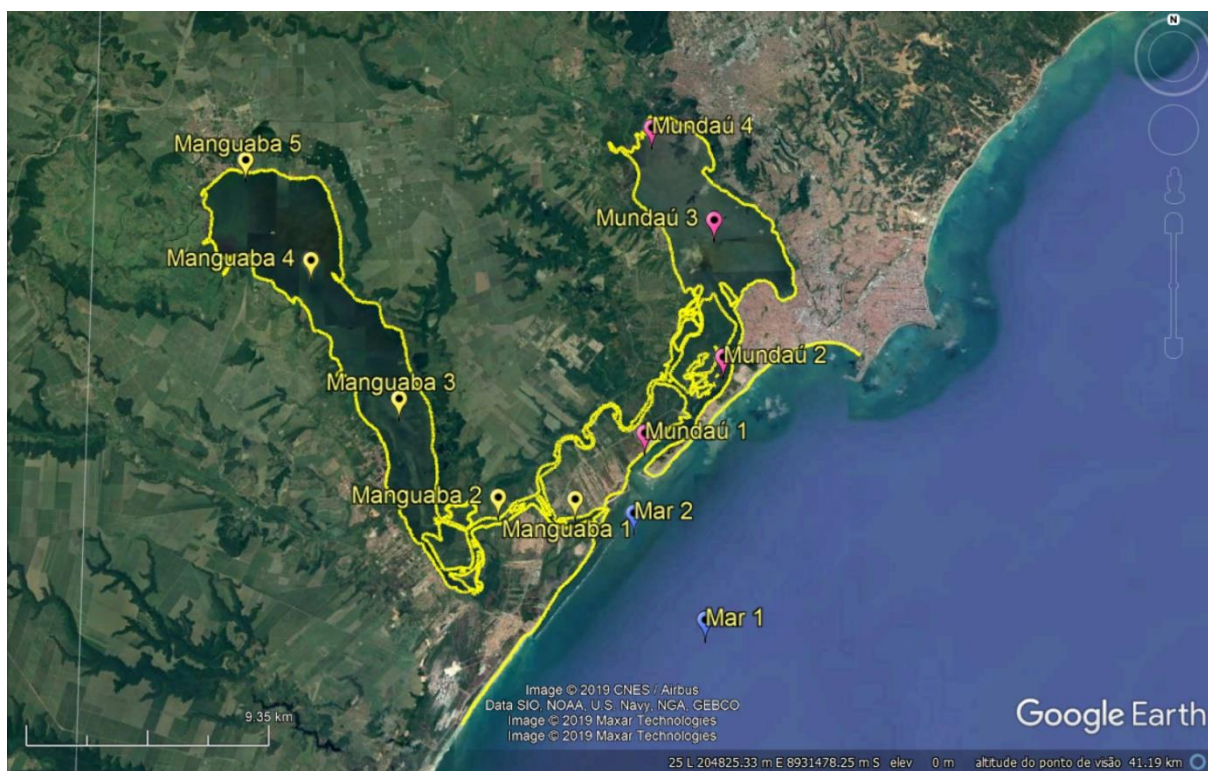


Figura 21 – Localização das 11 estações ao longo do Complexo Estuarino Laguna Mundaú/Manguaba

As componentes Leste-Oeste e Norte-Sul das velocidades de corrente obtidas pelo SisBaHiA®, apontadas nas Figuras 24 a 27 para o cenário de estiagem, mostram que as estações mais internas (mesmas que apresentam a menor amplitude nos valores da posição da superfície livre das lagunas), levam a valores praticamente nulos das componentes das velocidades, no período de quadratura e sizígia. Nas estações localizadas nos canais, as componentes Leste-Oeste são mais significativas, com velocidades que não ultrapassam 0.8 m/s em situação de maré de sizígia, e 0.4 m/s em situação de maré de quadratura. As estações Mundaú 1 e Manguaba 1 apresenta os maiores valores

de velocidade. Os valores para a velocidade na maré de quadratura ficaram 0,40 m/s na Laguna Mundaú e 0,20 m/s na Laguna Manguaba.

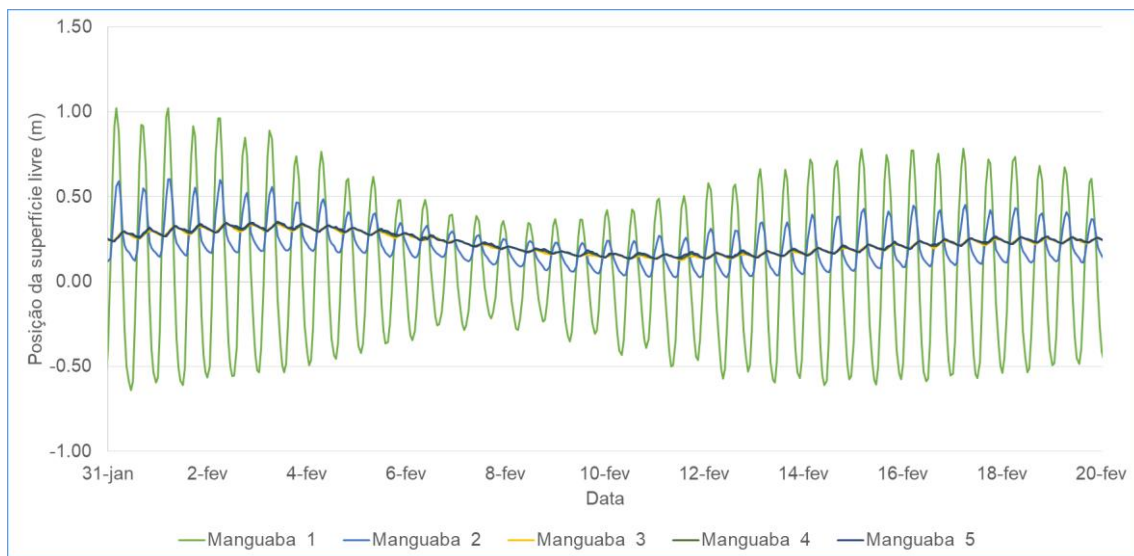


Figura 22 – Valores da posição da superfície livre nas estações ao longo da Laguna Manguaba no intervalo de 31/01/2014 a 20/02/2014.

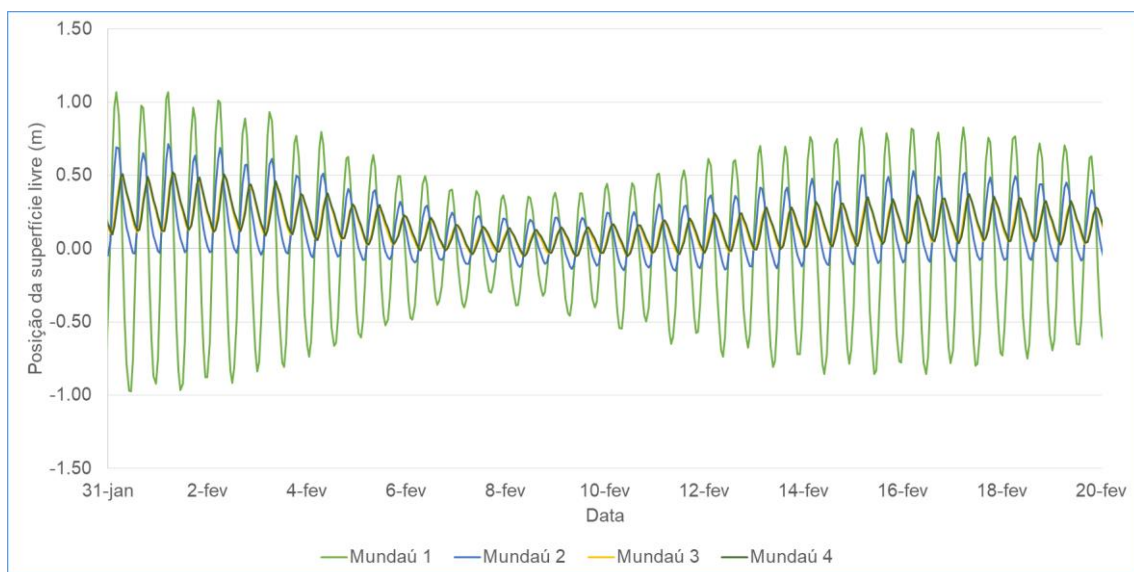


Figura 23 – Valores da posição da superfície livre nas estações ao longo da Laguna Mundaú no intervalo de 31/01/2014 a 20/02/2014

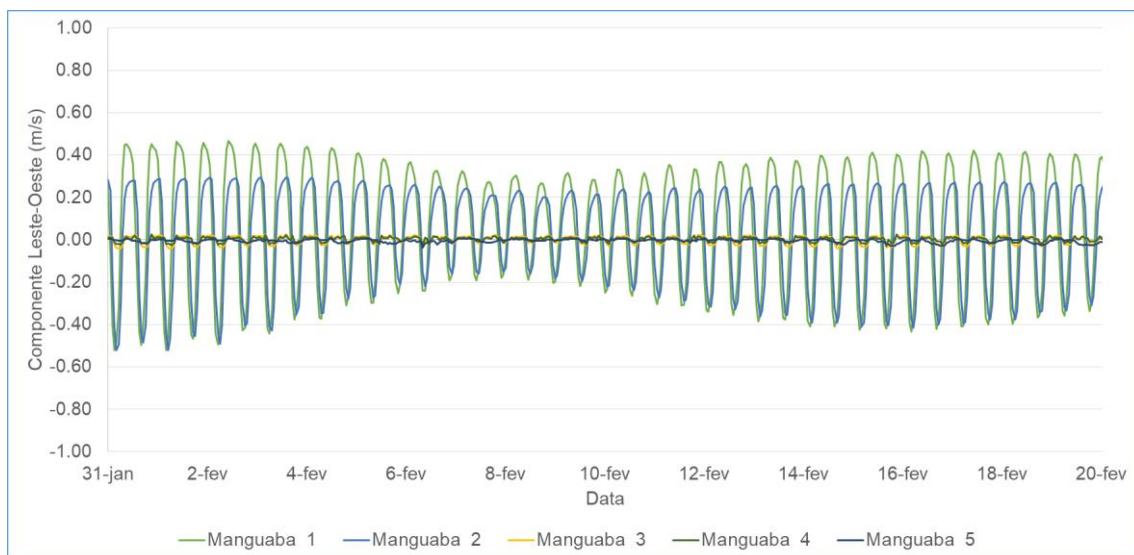


Figura 24 – Componente Leste-Oeste da velocidade (m/s) obtidas pelo SisBaHiA® nas estações da Laguna Manguaba entre 31/01/2014 e 20/02/2014.

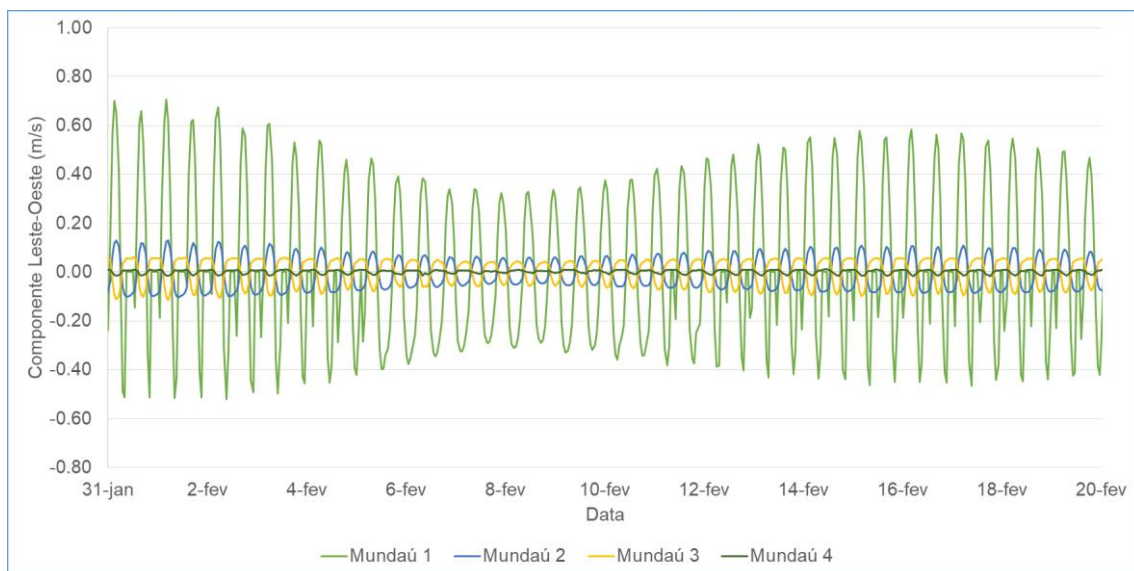


Figura 25 – Componente Leste-Oeste da velocidade (m/s) obtidas pelo SisBaHiA® nas estações da Laguna Mundaú entre 31/01/2014 e 20/02/2014.

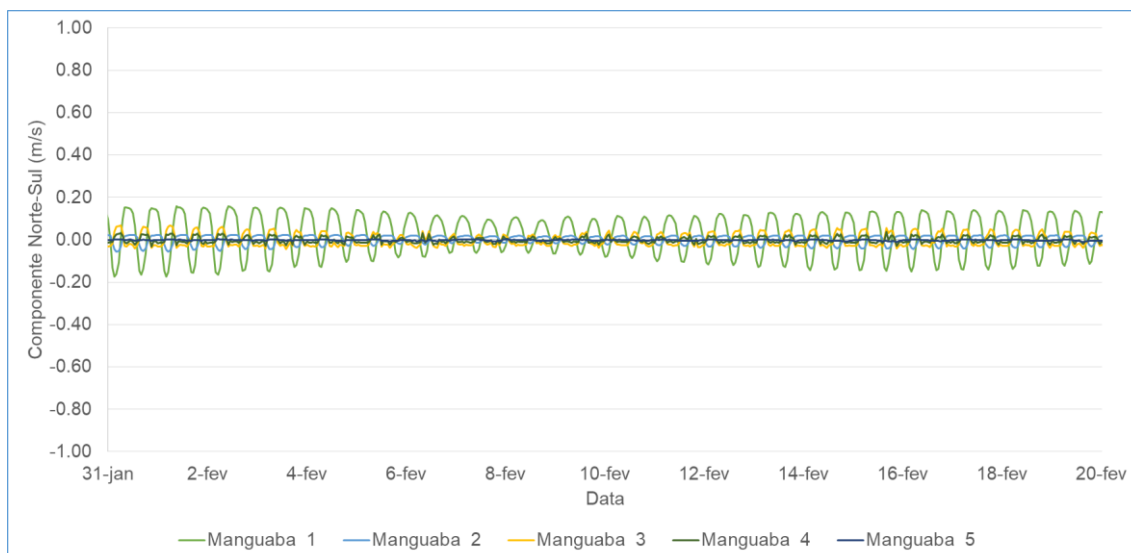


Figura 25 – Componente Norte-Sul da velocidade (m/s) obtidas pelo SisBaHiA® nas estações da Laguna Manguaba entre 31/01/2014 e 20/02/2014.

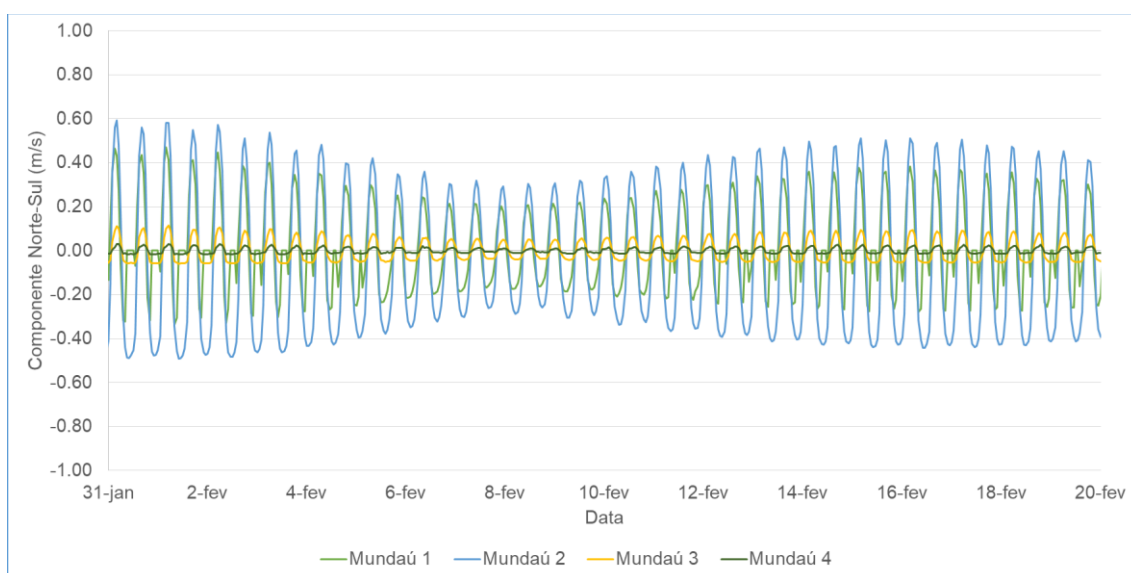


Figura 26 – Componente Norte-Sul da velocidade (m/s) obtidas pelo SisBaHiA® nas estações da Laguna Mundaú entre 31/01/2014 e 20/02/2014.

Para o período chuvoso da região, ficou definido o intervalo de 27/09/2014 a 15/10/2014. Esse intervalo de tempo não condiz com o período chuvoso propriamente dito, contudo, foi adotado esse intervalo para analisar o comportamento da vazão que ocorreu no dia 07/10/2014 referente a um valor acima dos valores das médias desse período, associado com os altos valores de pluviosidade medidos. Os valores da superfície livre são mostrados nas Figuras 27 e 28 para Lagunas Manguaba e Mundaú, respectivamente.

No período chuvoso podemos notar um comportamento diferente do período de estiagem, em que o pico de vazão ocorrido no dia 07/10/2014 causa uma abrupta elevação do nível da superfície livre, evidenciado nas estações internas das Lagunas.

Vale ressaltar que o comportamento da superfície livre das estações mais ao interior da Laguna Manguaba teve valores significativamente altos. No entanto, com poucas variações no período, os valores ficaram em torno de 1,50 m a 0,75 m, isso se deve à proximidade dessas estações com a embocadura do rio Paraíba do Meio. As estações da Laguna Mundaú apresentaram o mesmo comportamento de pico que na Laguna Manguaba, porém, os valores da posição da superfície livre das estações mais ao interior da Laguna não apresentaram uma variação significativa entre nos seus valores, diferentemente das estações da Laguna Mundaú, justificado pela perda de carga e pelo prisma de maré diferente que adentra as lagunas.

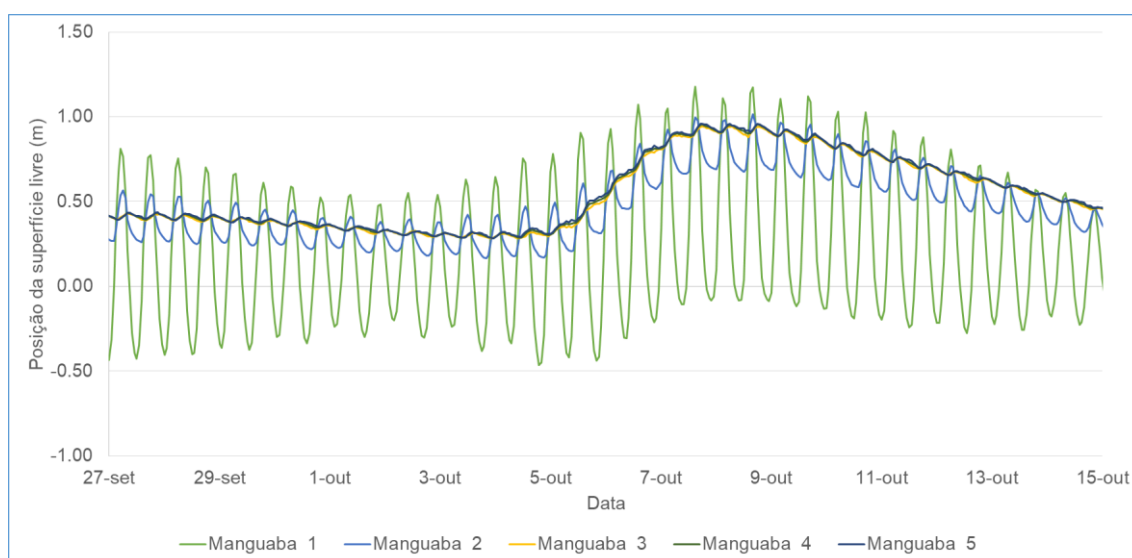


Figura 27 – Valores da posição da superfície livre nas estações ao longo da Laguna Manguaba no intervalo de 27/09/2014 a 15/10/2014.

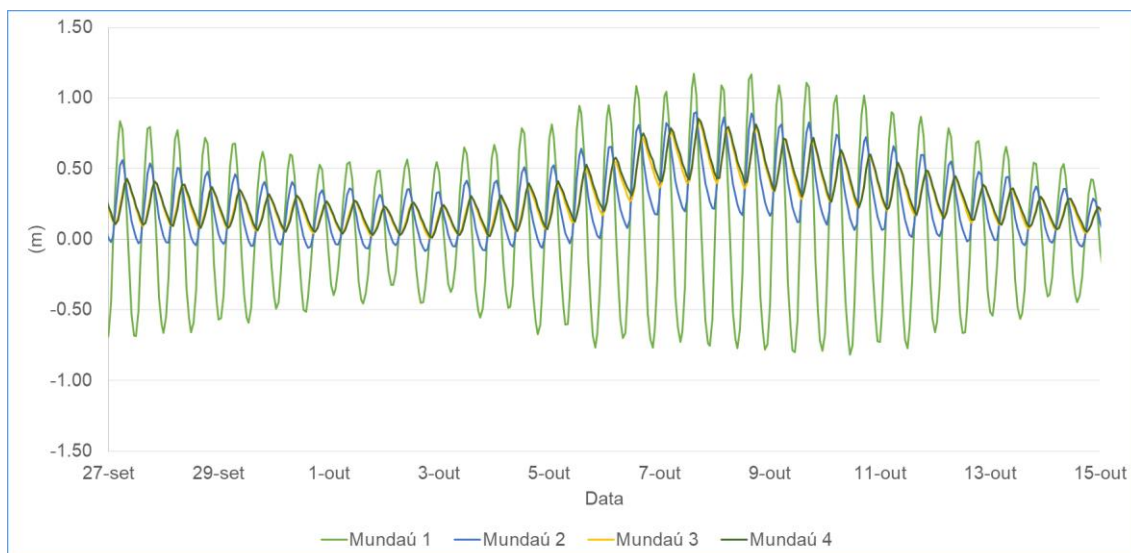


Figura 28 – Valores da posição da superfície livre nas estações ao longo da Laguna Mundaú no intervalo de 27/09/2014 a 15/10/2014.

O comportamento da componente Leste-Oeste da velocidade é mostrado nas Figura 29 e 30 para as Lagunas Manguaba e Mundaú, respectivamente; e a componente da velocidade Norte-Sul é apresentada nas Figura 31 e 32, também para as Lagunas Manguaba e Mundaú.

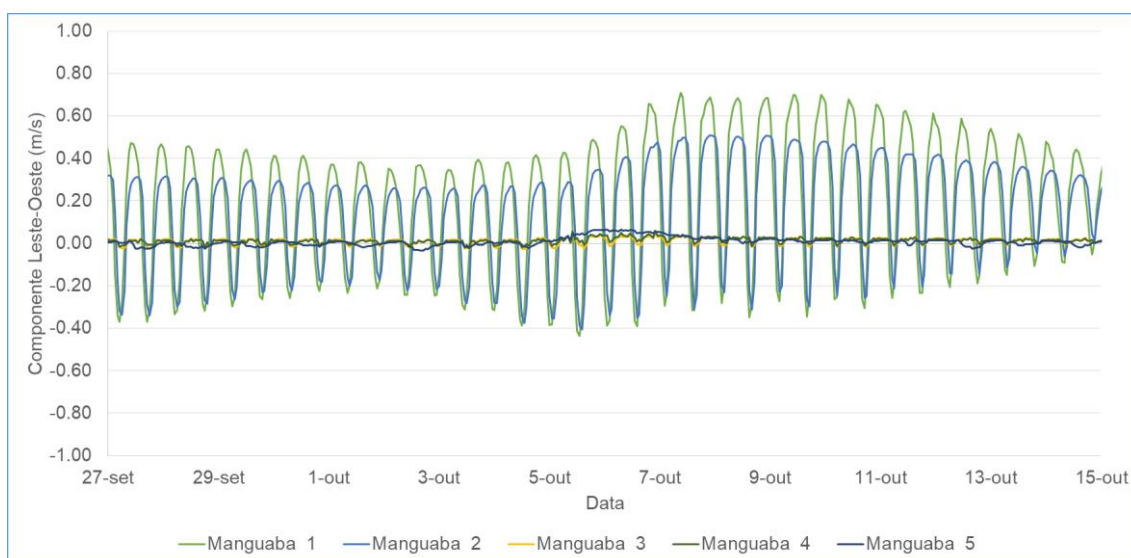


Figura 29 – Componente Leste-Oeste da velocidade (m/s) obtidas pelo SisBaHiA® nas estações da Laguna Manguaba entre 27/09/2014 a 15/10/2014.

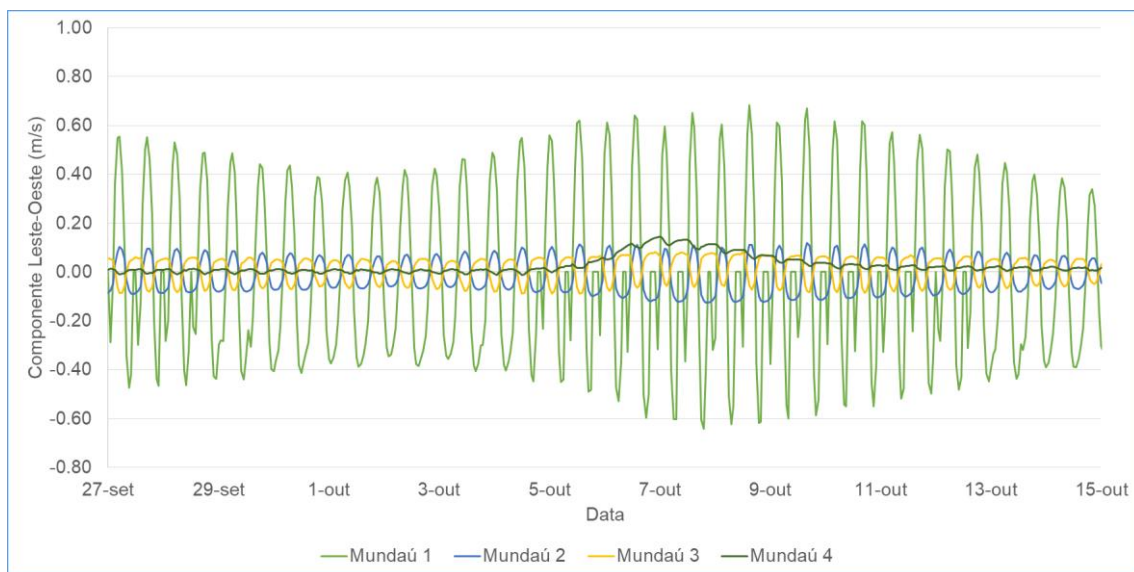


Figura 30 – Componente Leste-Oeste da velocidade (m/s) obtidas pelo SisBaHiA® nas estações da Laguna Mundaú entre 27/09/2014 a 15/10/2014.

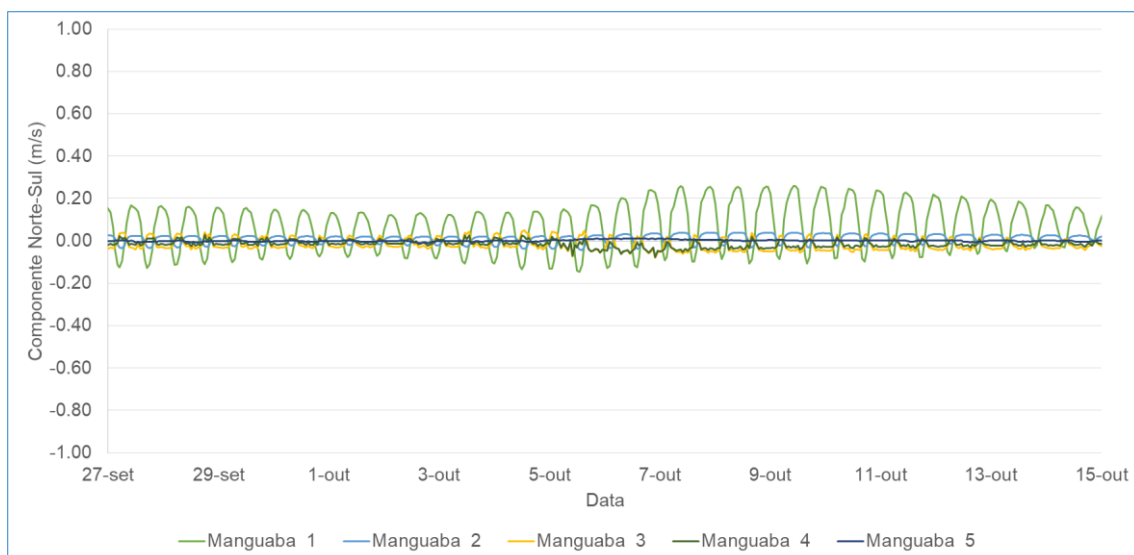


Figura 31 – Componente Norte-Sul da velocidade (m/s) obtidas pelo SisBaHiA® nas estações da Laguna Manguaba entre 27/09/2014 a 15/10/2014.

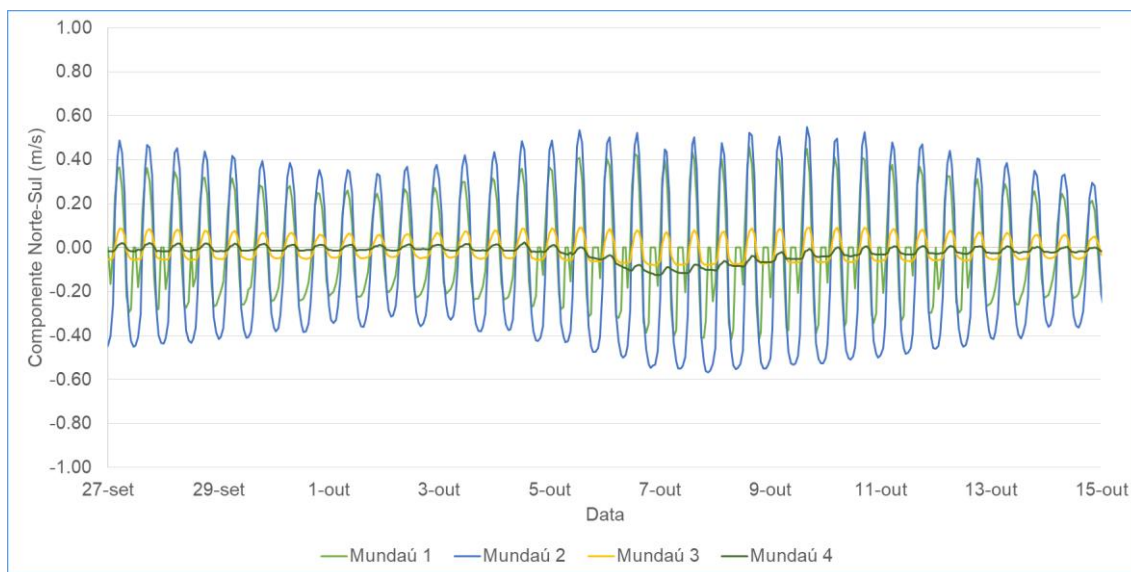


Figura 32 – Componente Norte-Sul da velocidade (m/s) obtidas pelo SisBaHiA® nas estações da Laguna Mundaú entre 27/09/2014 a 15/10/2014.

Para os resultados do período de chuva, podemos aferir que as componentes das velocidades tiveram uma mudança em razão do pico de vazão, ocorrido no dia 07/10/2014.

Os resultados para a Laguna Manguaba mostraram que as estações mais no interior do domínio apresentaram pouca ou quase nenhuma variação nos componentes Leste-Oeste das velocidades. Nas estações Manguaba 5, 4 e 3, diferentemente das estações Manguaba 1 e 2, onde apresentaram valores de 0,80 m/s no período de sizígia e 0,4 m/s no períodos de quadratura mostrando uma tendência maior de vazante.

As componentes Norte-Sul das velocidades da Laguna Manguaba apresentam valores muito menores que as componentes Leste-Oeste, mostrando que essa é a componente menos importante a Laguna Manguaba. Os maiores valores não ultrapassam 0,40 m/s, apresentados na estação Manguaba 1 no período chuvoso para o período de sizígia. Para o período de quadratura os valores ficam, em módulos com valores de 0,20 m/s.

Analisando as componentes Leste-Oeste das velocidades da Laguna Mundaú, a estação que teve os maiores valores foi a Mundaú 1, que apresenta um comportamento similar com o período de estiagem. A estação que apresentou um comportamento correlacionado com o pico de vazão que ocorreu no dia 07/10/2014 foi a estação Mundaú 4, devido à sua proximidade com o rio Mundaú.

As componentes Norte-Sul das velocidades apresentam os valores de até 0,6 m/s, na estação Mundaú 1 no período de maré de sizígia, e para as marés de quadratura, os valores máximos chegam a 0,40 m/s.

6. RESULTADOS DO SisBaHiA® PARA O TEMPO DE RESIDÊNCIA

Nesta seção são apresentados os resultados das aplicações do Modelo Lagrangeano do SisBaHiA® para o cálculo do tempo de residência referentes aos cenários propostos, utilizando como base os resultados obtidos pelo modelo de circulação hidrodinâmico.

Os cenários propostos foram definidos conforme os dados levantados para o ano de 2014, visando analisar situações distintas durante o ano. A priori, iremos utilizar dois períodos, divididos conforme os resultados da circulação hidrodinâmica, sendo um intervalo de estiagem e um intervalo chuvoso. Para o período de estiagem, foi definido da data de 21/01/2014 a 22/04/2014, quando os dados de vazões e pluviosidade apresentam os menores valores. Para o intervalo chuvoso foi definido o intervalo de 15/08/2014 a 15/11/2014, que apresenta os dois picos de vazões e pluviosidade do ano, caracterizando um cenário de vazante, significativo no CELMM.

As partículas, em todos os cenários, foram dispostas dentro do domínio, com uma distância de 100,0 m entre si. As partículas foram distribuídas nas Lagunas e nos canais de ligação; não foi considerada na região costeira. Também foram definidos, para os dois intervalos, valores diferentes para o coeficiente de absorção do modelo Lagrangeano: o valor 1,0, para a absorção total das partículas pela fronteira e 0,0, para a reflexão total ou absorção nula das partículas, quando se encontram com as fronteiras do domínio. Os resultados são representados em isolinhas do tempo de residência e distribuição das partículas em diferentes instantes.

A Figura 33 e 34 representa a distribuição das partículas no instante final, com absorção total e nula, respectivamente. A Figura 35 e 36 representa os valores das isolinhas do tempo de residência para absorção total e nula, respectivamente.

Podemos observar, na distribuição das partículas, nas duas situações com os valores diferentes de coeficiente de absorção, que há uma quantidade

maior de partículas no interior das lagunas no instante final, principalmente na Laguna Manguaba.

Para a situação do coeficiente de absorção com o valor um, em sua maior parte, a Laguna Mundaú e a região mais próxima ao canal ligação das Laguna Manguaba não há presença expressiva de partículas. No que diz respeito a Laguna Mundaú, as partículas ficam mais concentradas ao norte, em uma região mais isolada, e mais ao centro da laguna, em um local mais raso. Em relação aos canais não há, presença significativa de partículas em seu percurso, mesmo nas regiões mais estreitas no CELMM.

Para o coeficiente de absorção com o valor zero, temos uma maior presença das partículas no CELMM, sendo a região sul da Laguna Mundaú e a região oeste da Laguna Manguaba, as que apresentam a maior quantidade de partículas.

As isolinhas de tempo de residência com o coeficiente de absorção zero (Figura 36), mostram que a Laguna Manguaba apresenta, em seu domínio, os maiores tempos de residência, com valores próximos a 92 dias na sua região norte, para o período de estiagem. Em relação a Laguna de Mundaú, os valores do tempo de residência apresentam, em média, na sua região norte-central, valores entre 92 dias. Tais valores são referentes ao período modelado, onde precisaria de um maior período para estabelecer um tempo de residência para essas regiões. Nas regiões dos canais, os valores ficaram em torno de 16 dias para os resultados de coeficiente de absorção nula.

As isolinhas de tempo de residência, para o coeficiente de absorção com valor de um (Figura 35), apresenta uma significativa mudança. De uma maneira geral, o tempo de residência ficou menor para quase todo o domínio. Os valores do tempo de residência para essa situação na região da Laguna Mundaú ficaram com os valores de 50 dias na região central; os valores do tempo de residência diminuíram nas áreas mais próximas ao contorno de terra. A região dos canais de ligação apresentou os menores valores do tempo de residência, ficando com valores em torno de 5 dias, justificado pelas altas velocidades apresentadas nos resultados da circulação hidrodinâmica nas estações Mundaú 1 e 2, Manguaba 1 e 2.

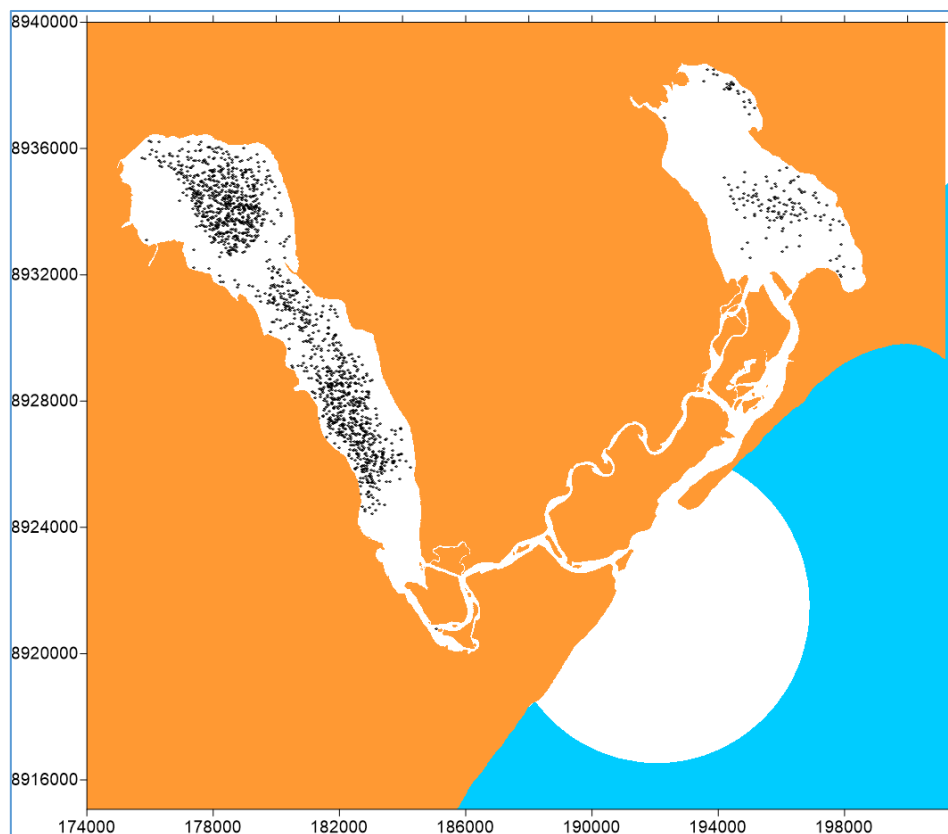


Figura 33 – Instante final da distribuição das partículas em todo o domínio no período de estiagem no CELMM, com absorção total das partículas.

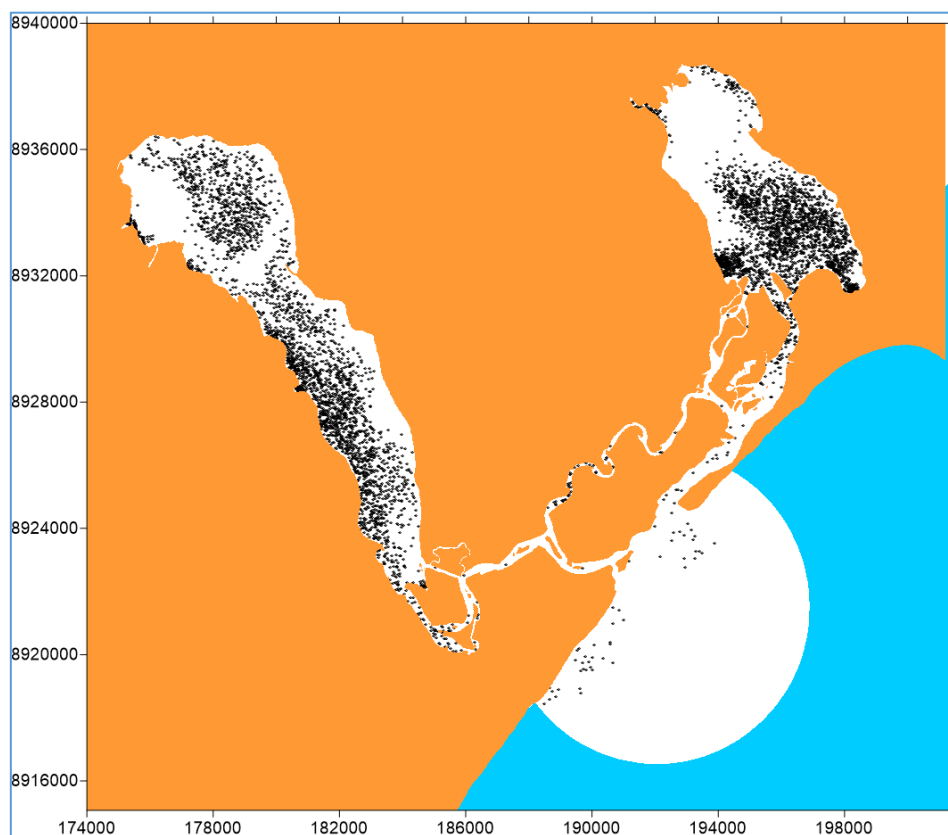


Figura 34 – Instante final da distribuição das partículas em todo o domínio no período de estiagem no CELMM, com absorção nula das partículas.

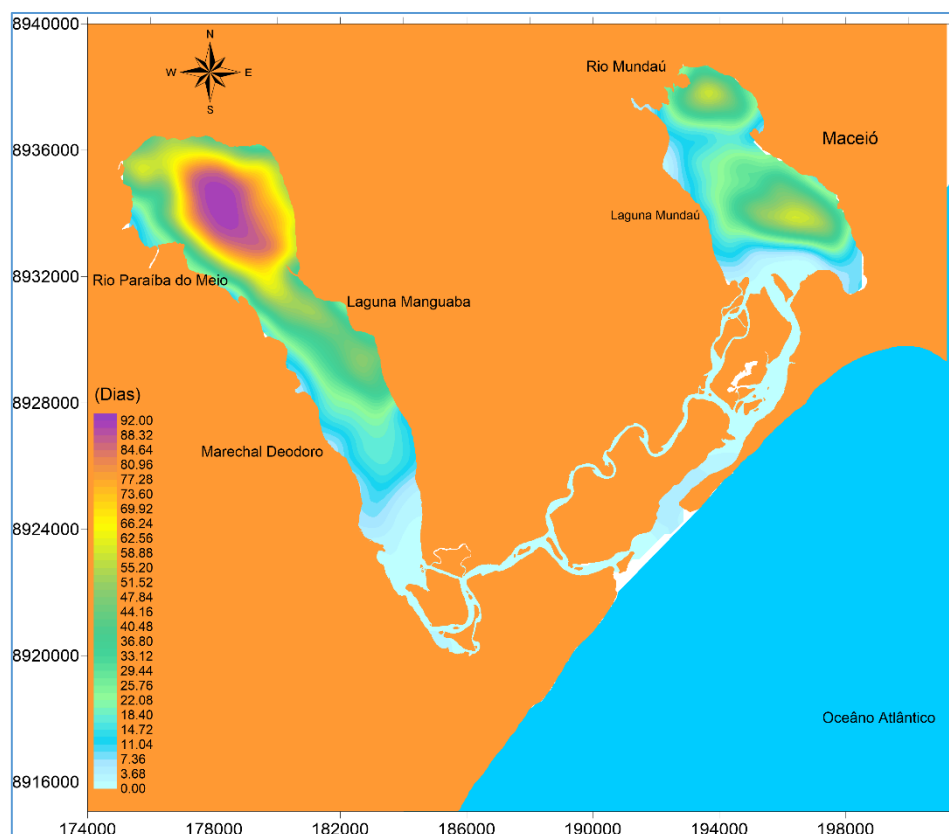


Figura 35 – Isolinhas do tempo de residência no período de estiagem com absorção total das partículas.

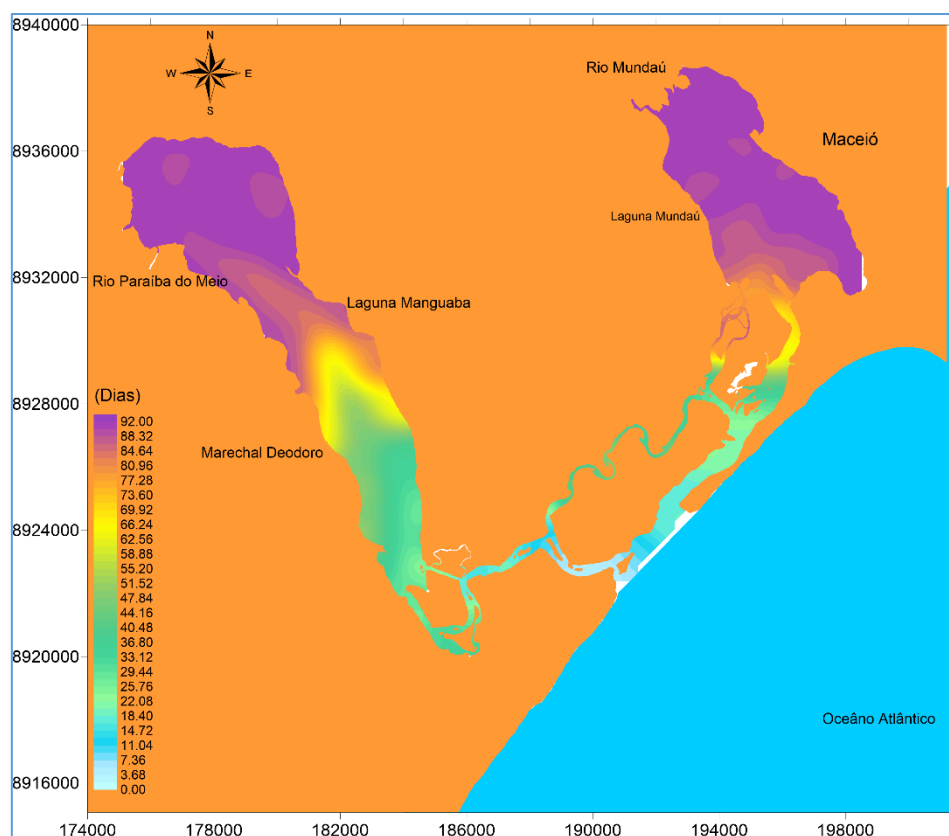


Figura 36 – Isolinhas do tempo de residência no período de estiagem absorção nula das partículas.

Para o intervalo chuvoso ficaram definidas as datas de 15/08/2014 a 15/11/2014, quando os dois maiores picos de vazão aconteceram nos dias de 09/08/2014 e 07/10/2014, em que tiveram, nos dias anteriores a esses, uma abrupta elevação das vazões. Vale ressaltar que no início do cenário modelado para o transporte Lagrangeano, o sistema está sobre influência de uma maré de sizígia.

As Figura 38 e 39 representam a distribuição das partículas no instante final da modelagem, com o valor de um e zero para o coeficiente de absorção. As Figuras 40 e 41 mostram as isolinhas do tempo de residência ao final da simulação do transporte Lagrangeano para os coeficientes de absorção um e zero, respectivamente.

Observando o resultado, no instante final, da distribuição das partículas no período chuvoso, podemos destacar um comportamento mais efetivo na saída do material particulado no CELMM, ocasionado pelos elevados valores de vazões nesse período, sendo que praticamente não é possível observar a permanência de partículas no CELMM, principalmente quando ocorre a absorção total das partículas; com a reflexão total (coeficiente de absorção igual a zero), algumas partículas ainda ficam retidas dentro das lagunas.

As isolinhas do tempo de residência (TR) com o coeficiente de absorção zero mostram um comportamento diferente em relação ao período de estiagem. O maior valor de TR foi definido na porção norte da Laguna Mundaú, sendo próximo de 75 dias, para região da Laguna Manguaba os maiores valores ficaram em torno de 60 a 65 dias.

Para o resultado das isolinhas de tempo de residência com o coeficiente de absorção um, houve uma diferença muito grande em relação ao período de estiagem, com valores bem menores. Apenas na região norte da Laguna Manguaba, os valores do tempo de residência ficaram acima de 50 dias, para a região mais ao sul da laguna, os valores ficaram entre 7 a 15 dias. Para a Laguna Mundaú os valores ficaram dentro do intervalo de 7 a 17 dias. Os valores encontrados nos canais de ligação ficaram com os valores muito baixos, entre 3 a 6 dias.

Com estes resultados, é possível afirmar que a vazão fluvial, quando apresenta valores expressivos, representa um fator importante no transporte de poluentes nas Lagunas, aumentando ainda mais a tendência de vazante

deste sistema. Notamos que a vazão para que o dia 07/10/2014 provocou uma mudança considerável no sistema, onde pode ser exemplificado na distribuição das partículas no instante final do período chuvoso. A fim de analisar possíveis áreas mais propícias a estagnação de poluentes podemos aferir que a Laguna de Manguaba, em sua região mais ao norte apresenta a área mais crítica em relação aos maiores valores do tempo de residência (TR).

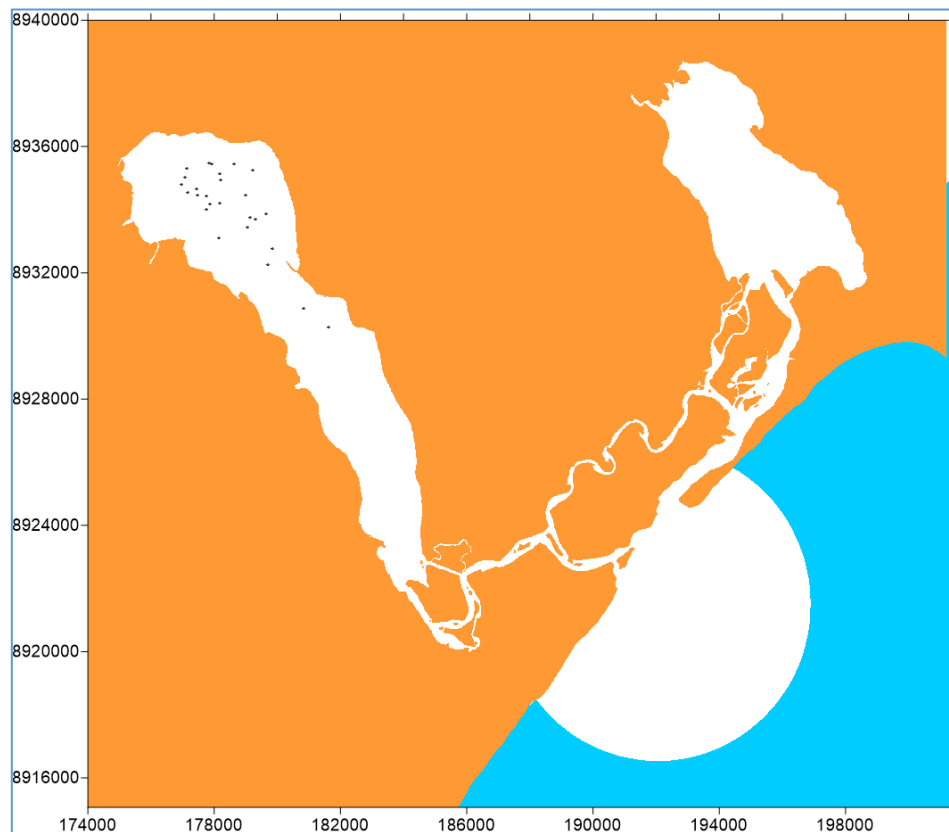


Figura 37 – Instante final da distribuição das partículas em todo o domínio no período chuvoso no CELMM com absorção total das partículas.

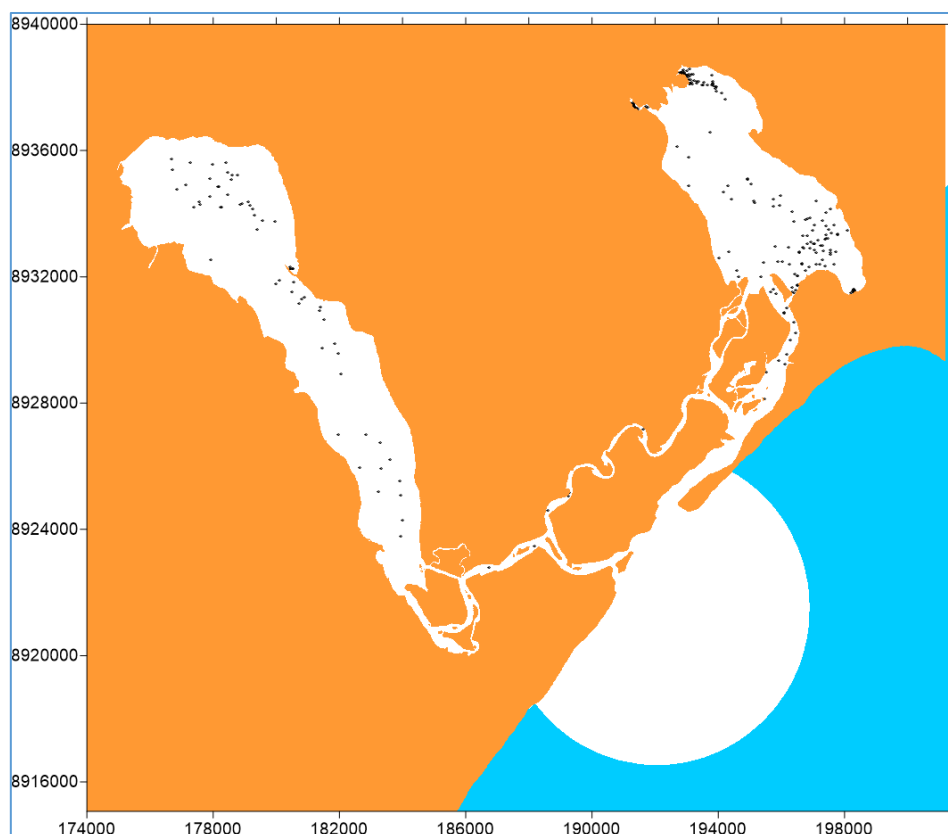


Figura 38 – Instante final da distribuição das partículas em todo o domínio no período chuvoso no CELMM com absorção nula das partículas.

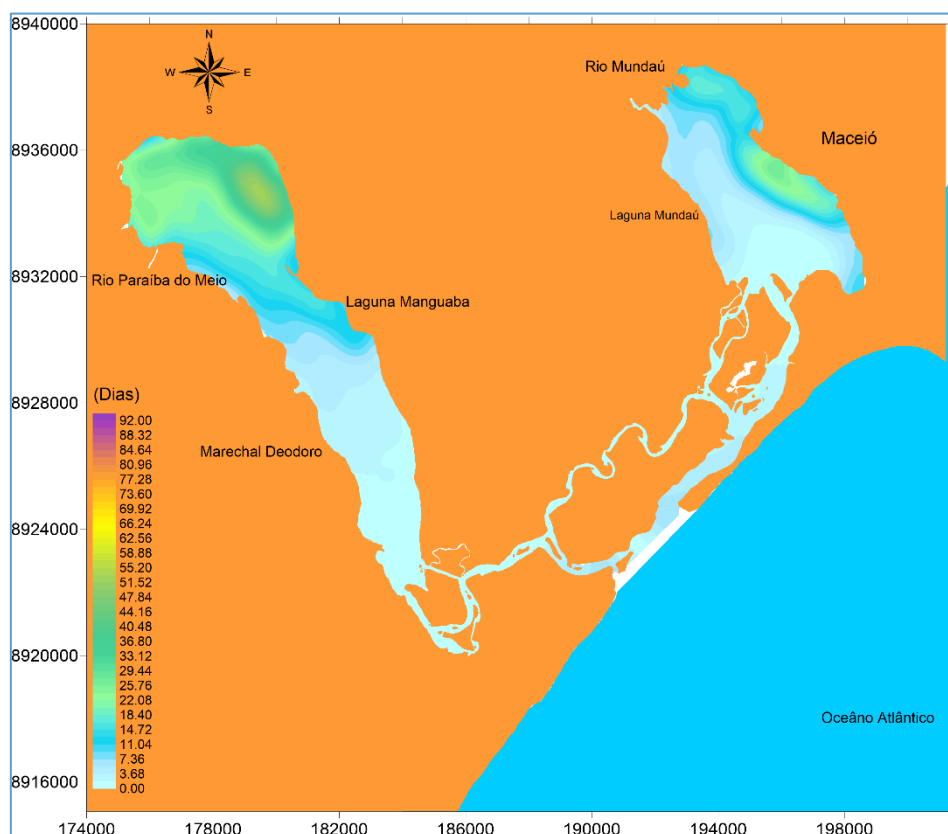


Figura 39 – Isolinhas do tempo de residência ao final do período chuvoso com absorção total das partículas.

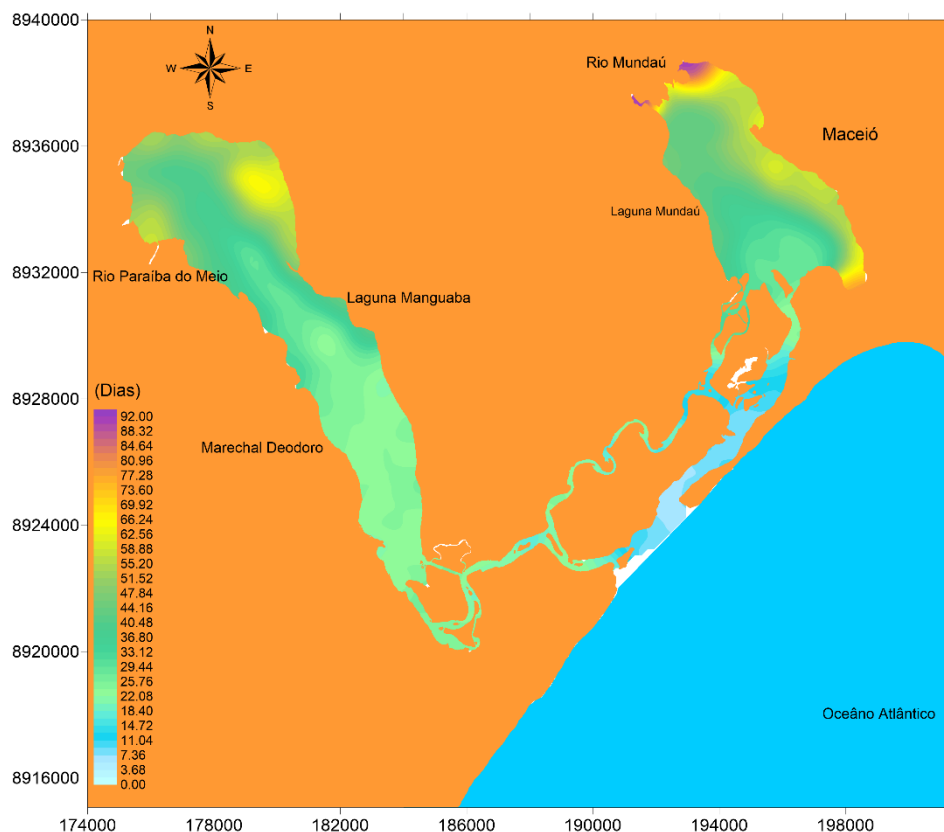


Figura 40 – Isolinhas do tempo de residência ao final do período chuvoso com absorção nula das partículas.

7. RESULTADOS DO SisBaHia® PARA O ESCOAMENTO RESIDUAL

O campo de velocidades residuais foi calculado para dois ciclos de maré, considerando 24 horas no dia 08/02/2014 para uma maré de quadratura, e em 15/02/2014, para um período de sizígia no cenário de estiagem. As Figuras 43 e 44 mostram os resultados obtidos para os dois períodos. Vale lembrar que a região costeira adjacente possui outros forçantes não computados nesta modelagem; sendo assim, o campo de velocidades residuais dessa região deve ser observado com cautela. Observando o campo de velocidades residuais nos canais e nas lagoas, verifica-se que as velocidades residuais são extremamente baixas nas lagoas, não ultrapassando valores de 0,01 m/s, tanto na sizígia quanto na quadratura; nas regiões dos canais, as velocidades residuais são maiores, para os dois períodos. A Figura 45 representa uma visão mais detalhada do comportamento das isolinhas do campo de corrente residual, onde destaca uma maior velocidade de 0,20 m/s na embocadura do canal na direção da Laguna Mundaú.

Com a definição do escoamento residual é possível verificar a formação de vórtices, ou regiões de recirculação, principalmente no período de sizígia. No canal de ligação para a Laguna de Mundaú (Figura 46), observa-se a formação de uma região de recirculação próxima ao estrangulamento, com a formação de um vórtice. Na Laguna de Mundaú (Figura 47), um vórtice é formado ao sul, mas com velocidades extremamente baixas e, para a Laguna Manguaba, na região mais ao norte, observa-se a formação de uma área de recirculação com velocidades muito baixas também.

Tais resultados do escoamento residual no período de estiagem têm concordância com os resultados mostrados para o tempo de residência no período 15/01/2014 a 15/04/2014, onde as regiões de recirculação no escoamento residual possuem os maiores tempos de residência no modelo Lagrangiano atreladas também as menores velocidades encontradas no modelo hidrodinâmico.

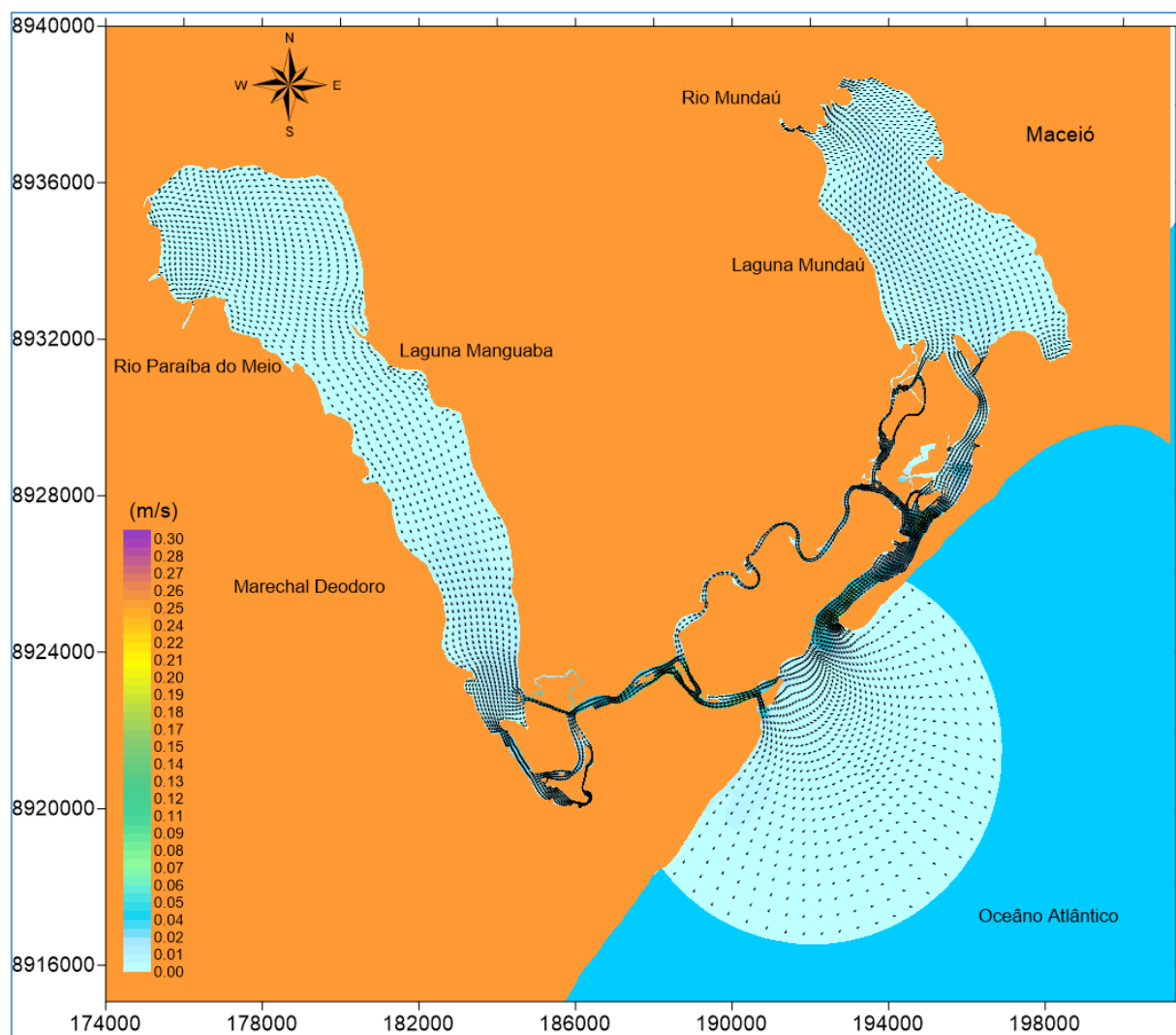


Figura 41 – Campo de correntes residual, em m/s, obtido numericamente pelo SisBaHiA®, considerando dois ciclos de maré, em 08/02/2014.

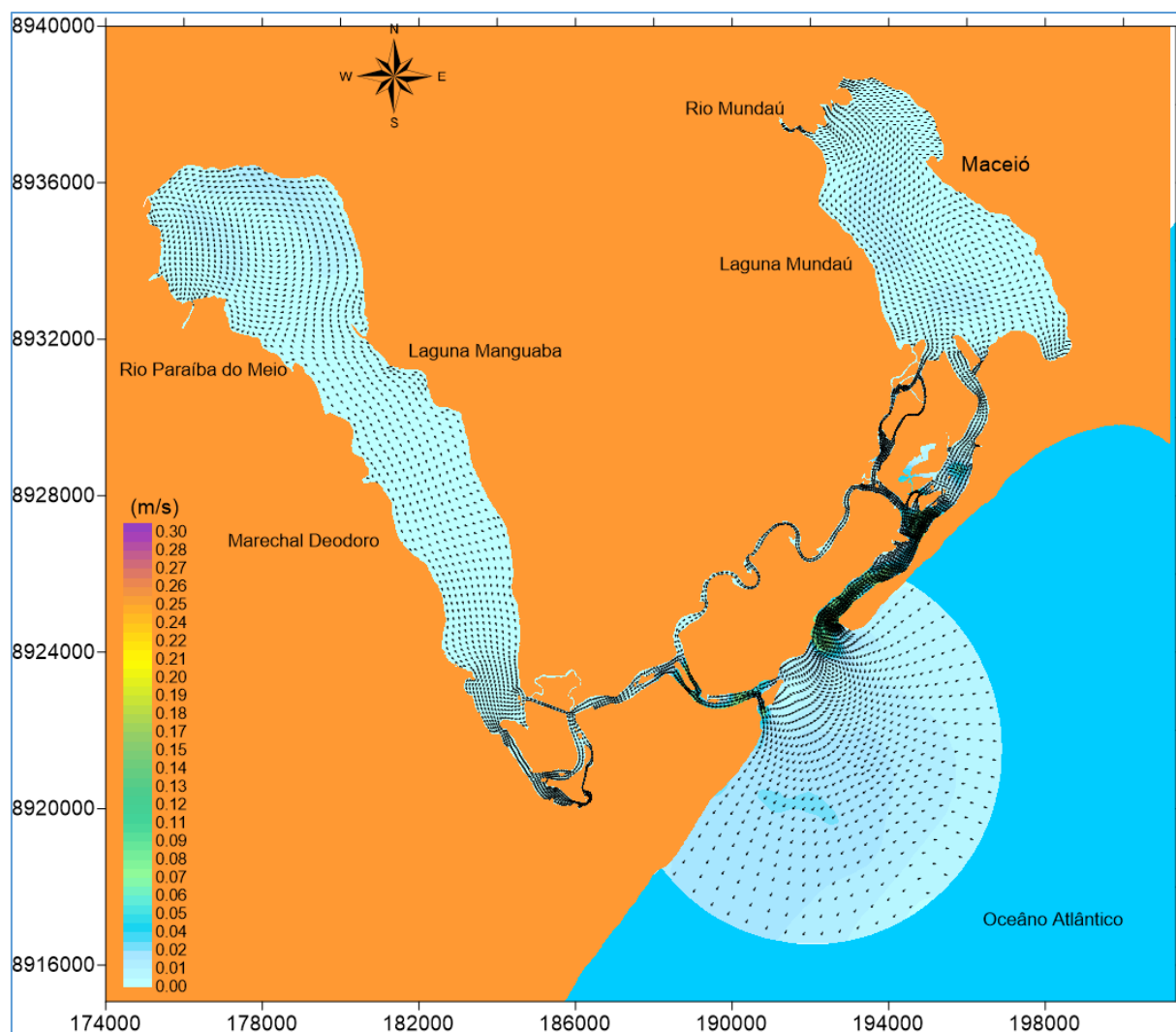


Figura 42 – Campo de correntes residual, em m/s, obtido numericamente pelo SisBaHiA®, considerando dois ciclos de maré, em 15/02/2014.

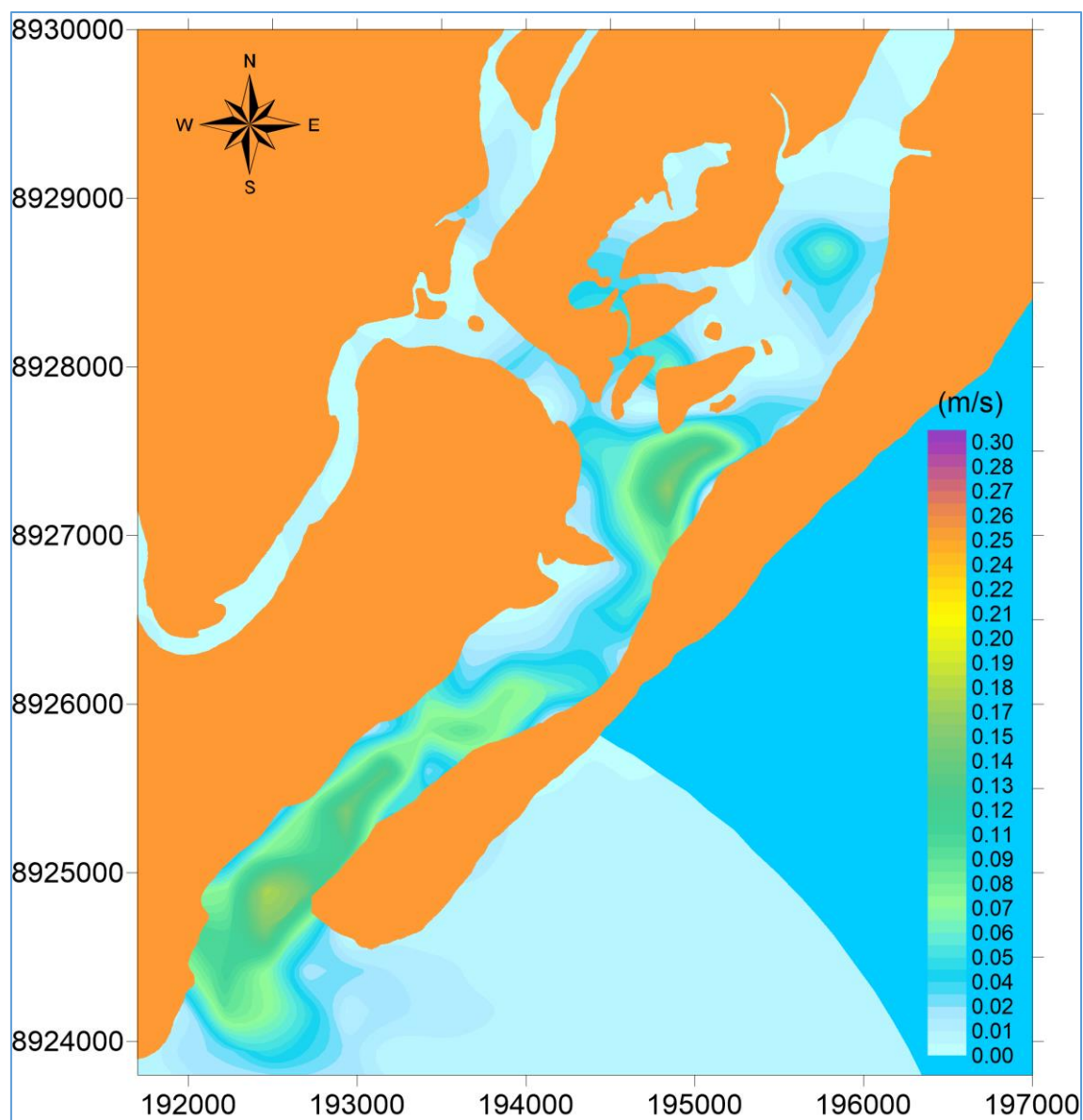


Figura 43 – Isolinhas do campo de correntes residual, em m/s, na região dos canais, obtido numericamente pelo SisBaHiA[®], considerando dois ciclos de maré de quadratura, em 15/02/2014.

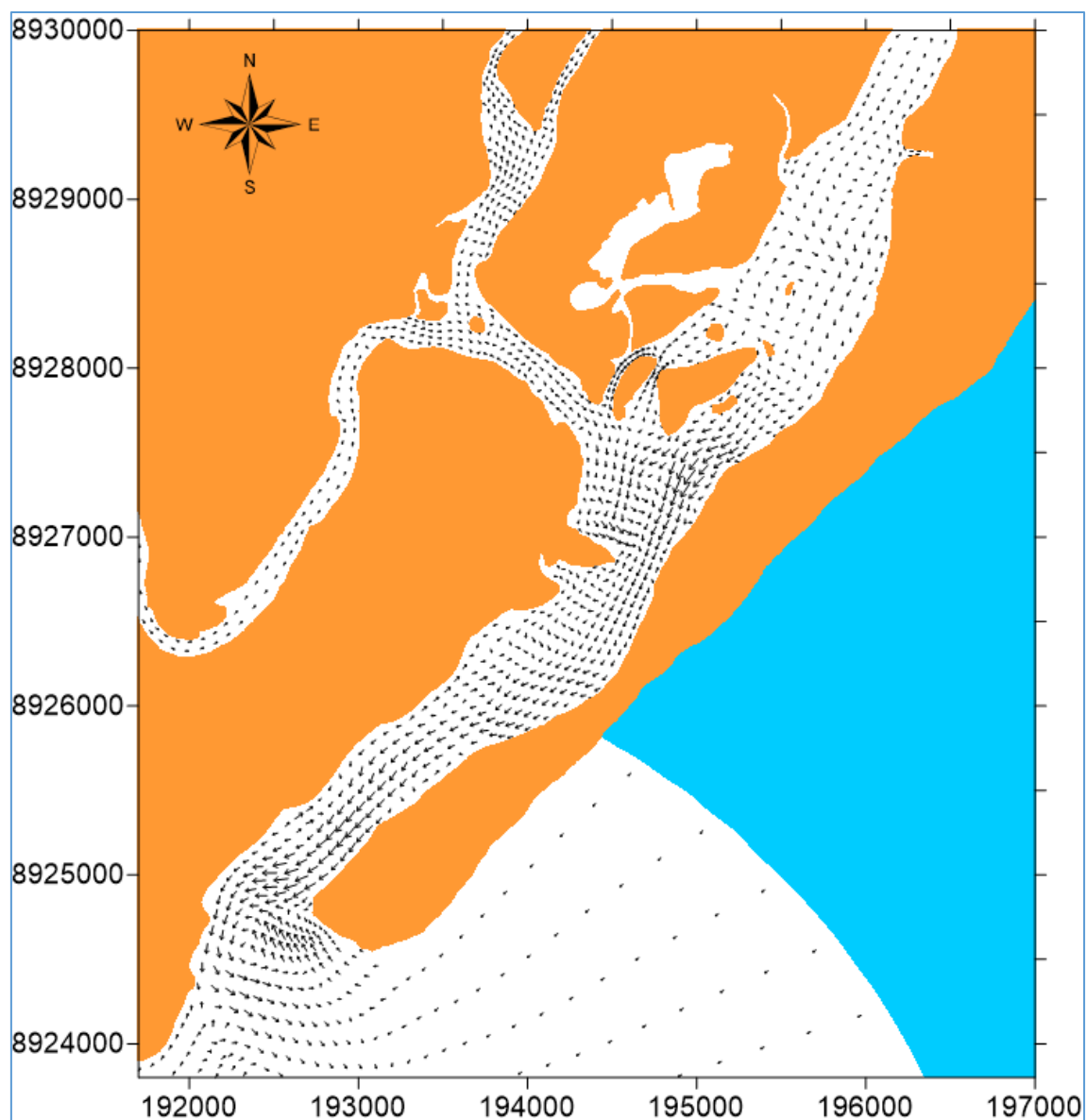


Figura 44 – Detalhe do campo de correntes residual, na região dos canais, obtido numericamente pelo SisBaHiA®, considerando dois ciclos de maré de quadratura, em 15/02/2014.

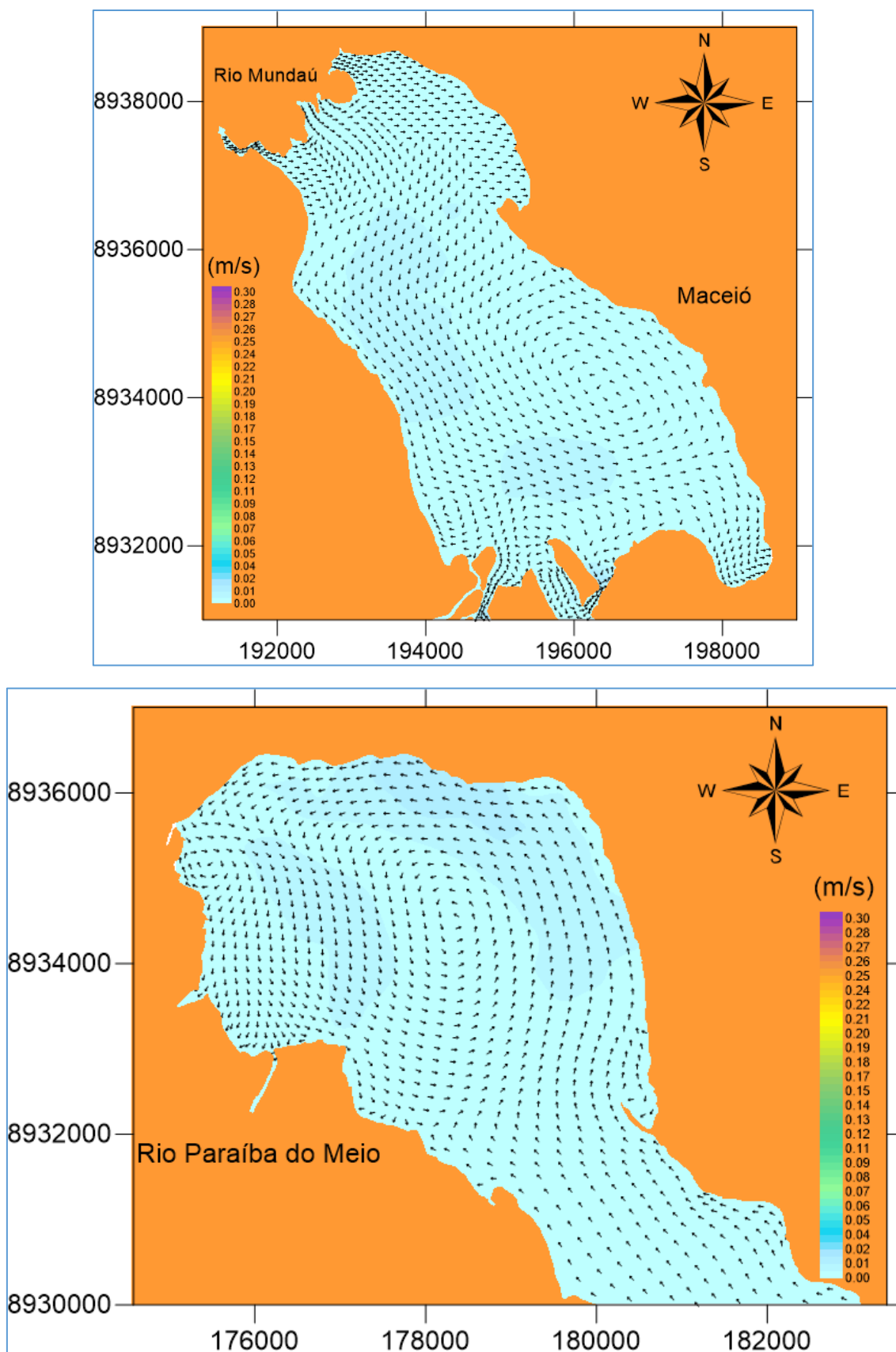


Figura 45 – Detalhe do campo de correntes residual, nas regiões das Lagunas De Mundaú (acima) e Manguaba, obtido numericamente pelo SisBaHiA®, considerando dois ciclos de maré de quadratura, em 15/02/2014.

Para o período chuvoso, o intervalo de 24 horas ficou definido para os dias de 02/10/2014 e 07/10/2014, sendo os intervalos que estão inseridos nos períodos de sizígia e quadratura, respectivamente. O dia 07/10/2014 foi escolhido para analisar o comportamento do escoamento residual diante ao pico de vazão que ocorreu nesse intervalo de tempo. As Figuras 48 e 49 representam os resultados obtidos para os dois períodos. Os valores obtidos são efeitos das forçantes que foram inseridas nas etapas de cálculo (maré, vento e vazão fluvial). Pode-se notar que os campos de velocidade para o intervalo do dia 02/10/2014 (sizígia) ficaram em sua maioria com valores próximos a 0,02 m/s e para o dia 07/10/2014 (quadratura) os valores ficaram no intervalo de 0,10 a 0,08 m/s, nas regiões próximas aos rios.

A Figura 50 mostra, em detalhe, as isolinhas do campo residual do canal de ligação com a Laguna Mundaú e no interior da própria laguna, referente ao pico de vazão do dia 07/10/2014. Pode-se notar que os valores da velocidade nos canais de chegam a 0,35 m/s, próximo a embocadura de ligação com o mar. Para a região próxima ao aporte fluvial do Rio Mundaú, notamos valores de 0,30 m/s, diferentemente no período de estiagem, que apresentou valores próximos de 0,01 m/s; tal situação evidencia o pico de vazão ocorrido no dia 07/10/2014.

No estudo do escoamento residual para o dia 07/10/2014 é possível verificar a formação de vórtices, ou regiões de recirculação dentro CELMM. No canal de ligação entre o mar e a Laguna Mundaú (Figura 51), observa-se a formação de uma região de recirculação próxima ao estrangulamento, com a formação de um vórtice. Os valores das velocidades da corrente residual dessa região são maiores em relação a outras regiões. A Laguna Mundaú (Figura 52), apresenta um comportamento de não há uma presença tão incisiva de vórtices em seus domínios, o local que apresenta uma pequena recirculação é a região norte da laguna. No que diz respeito a Laguna Manguaba (Figura 52), no período do pico de vazão, ela apresentou um comportamento diferente em relação ao período de estiagem, onde foi notado a inexistência das regiões de recirculação, presente no dia 15/02/2014.

Percebe-se que os resultados do escoamento residual no período chuvoso estão de acordo com os resultados obtidos pelos testes anteriores, o de circulação hidrodinâmica e o modelo de transporte Lagrangeano. Devido à enorme vazão que ocorreu no dia 07/10/2014, as velocidades de corrente residual aumentaram, contribuindo para que o sistema tenha um comportamento de vazante, propiciando uma relação adequado com os valores do tempo de residência, que diminuirão, devido também à falta de regiões de recirculações e estagnação, nas duas lagunas.

Portanto, considerando todos os resultados descritos anteriormente, podemos aferir que existem algumas regiões sensíveis a uma maior degradação, pelo acúmulo de poluentes. Tais regiões são o norte da região da Laguna Manguaba e a região central da Laguna Mundaú, que apresentaram os maiores tempos de residência e as menores velocidades de corrente do escoamento residual.

Deve-se deixar claro que a Laguna Mundaú, por fazer fronteira com a capital do estado, Maceió, tem uma situação mais delicada; estudos de modelagem de qualidade da água devem ser desenvolvidos, quantificando o aporte das cargas poluidoras que adentram ao domínio e as consequências sobre a Laguna Mundaú.

Brito et al. (2018) obtiveram valores similares de tempo de residência com absorção total das partículas pelas fronteiras, com um valor de 65 dias em certas regiões da Laguna Mundaú, definindo locais suscetíveis a degradação provocada pelas ocupações irregulares, principalmente nas regiões próximas a capital do estado de Alagoas, região leste da Laguna Mundaú, onde há uma ocupação desordenada nas encostas da laguna possibilitando uma região suscetíveis a degradação.

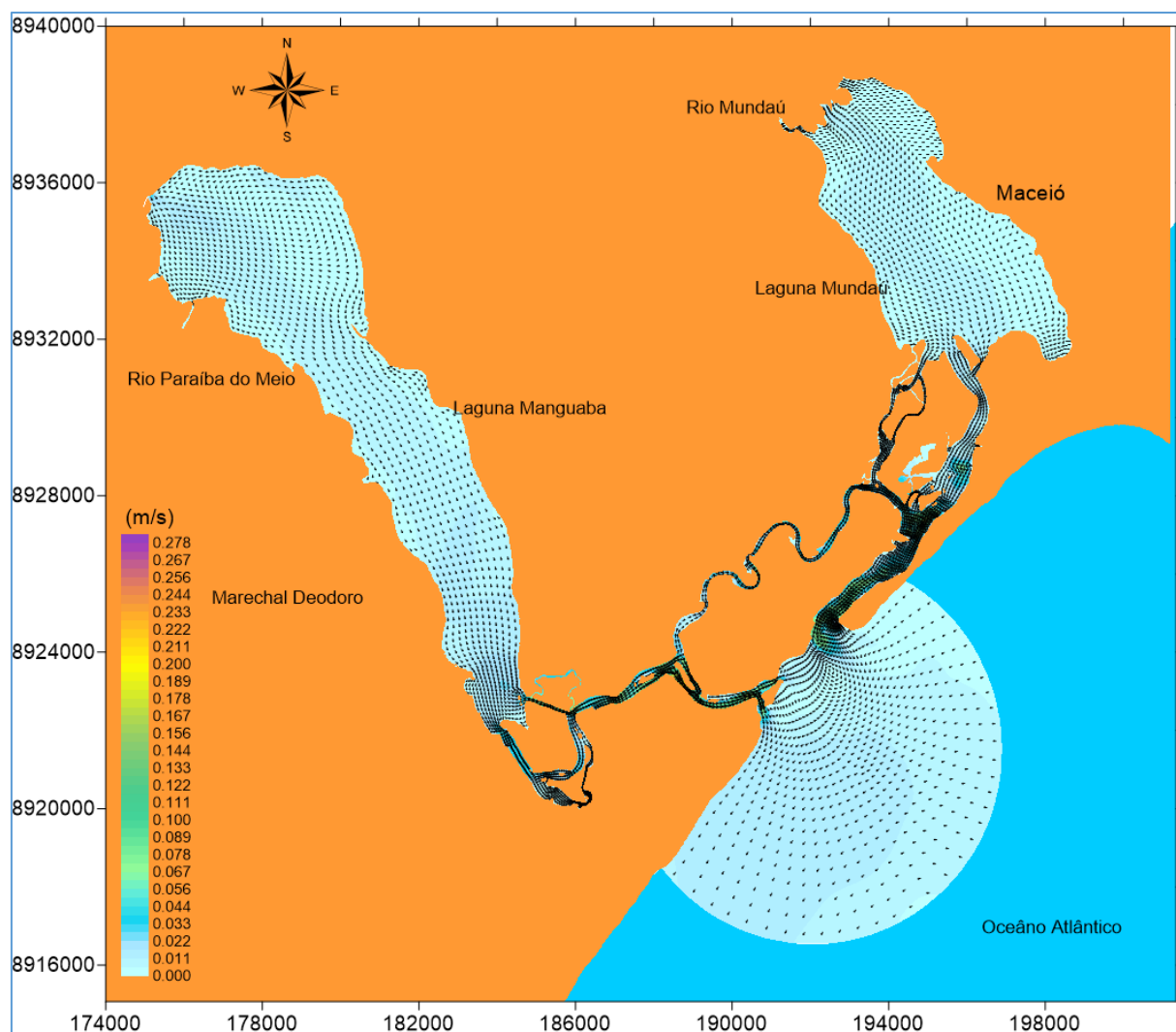


Figura 46 – Campo de correntes residual, em m/s, obtido numericamente pelo SisBaHiA®, considerando dois ciclos de maré, em 02/10/2014.

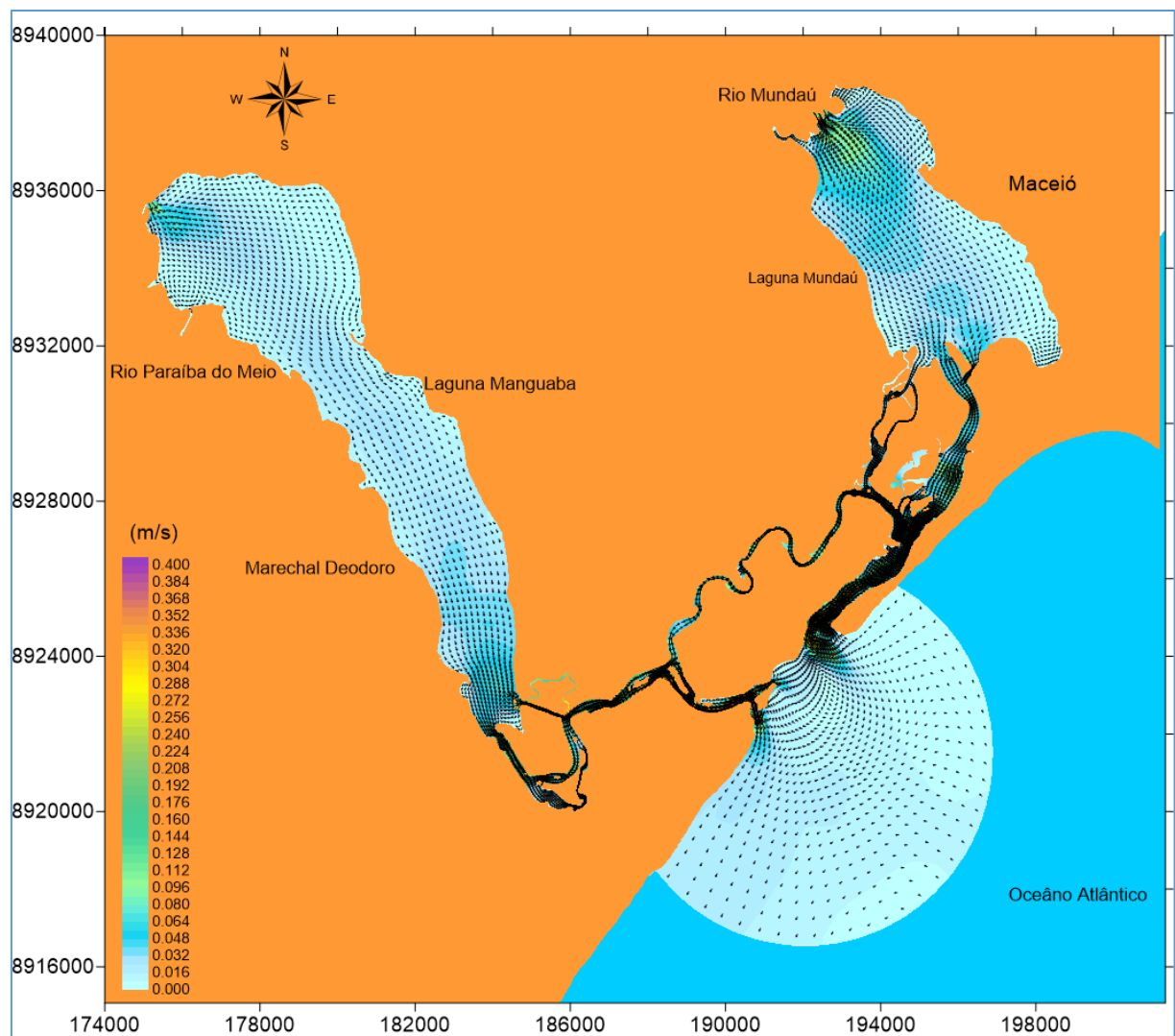


Figura 47 – Campo de correntes residual, em m/s, obtido numericamente pelo SisBaHiA®, considerando dois ciclos de maré, em 07/10/2014.

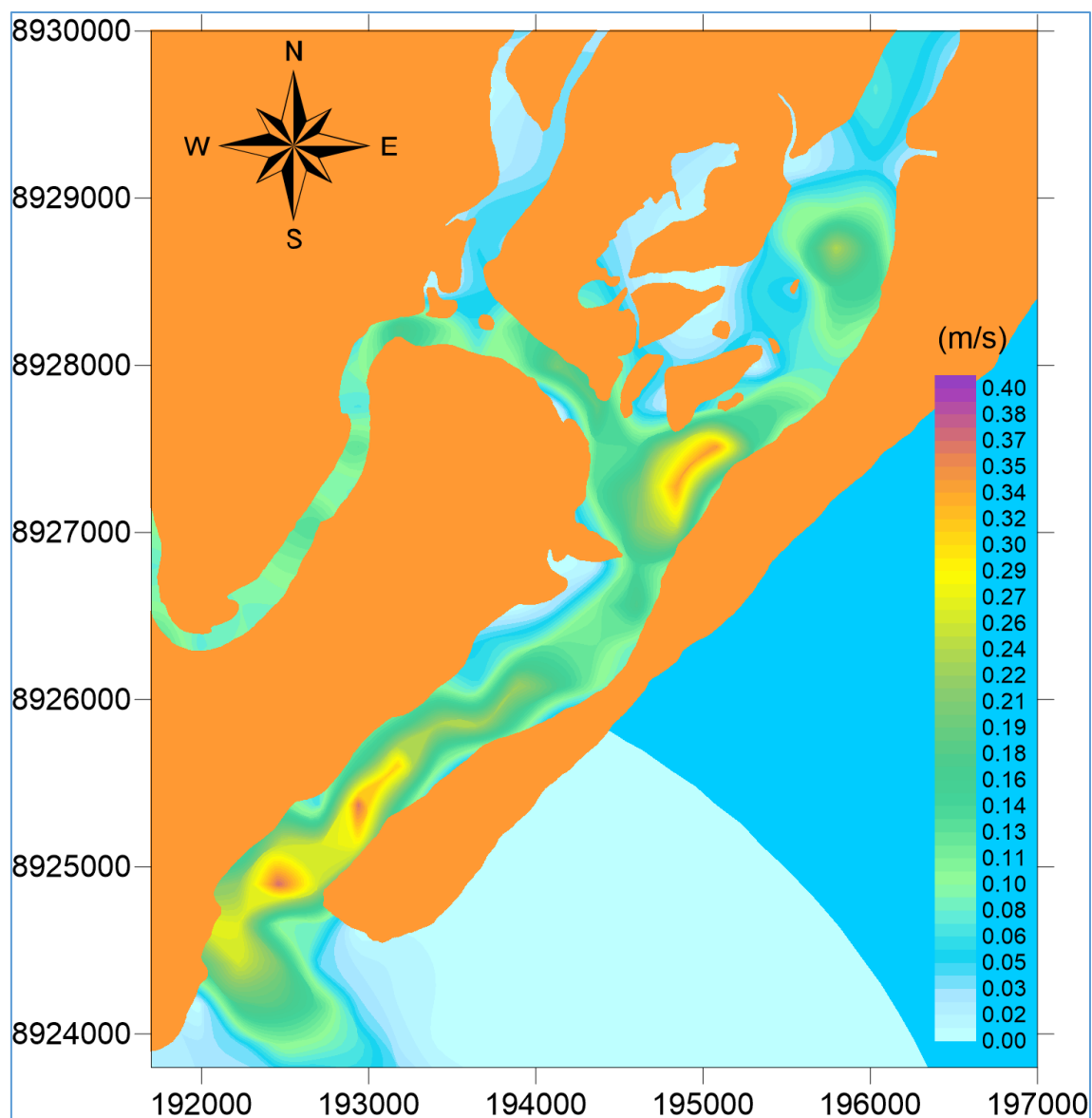


Figura 48 – Isolinhas do campo de correntes residual, em m/s, na região dos canais, obtido numericamente pelo SisBaHiA®, considerando dois ciclos de maré no período de quadratura, em 07/10/2014.

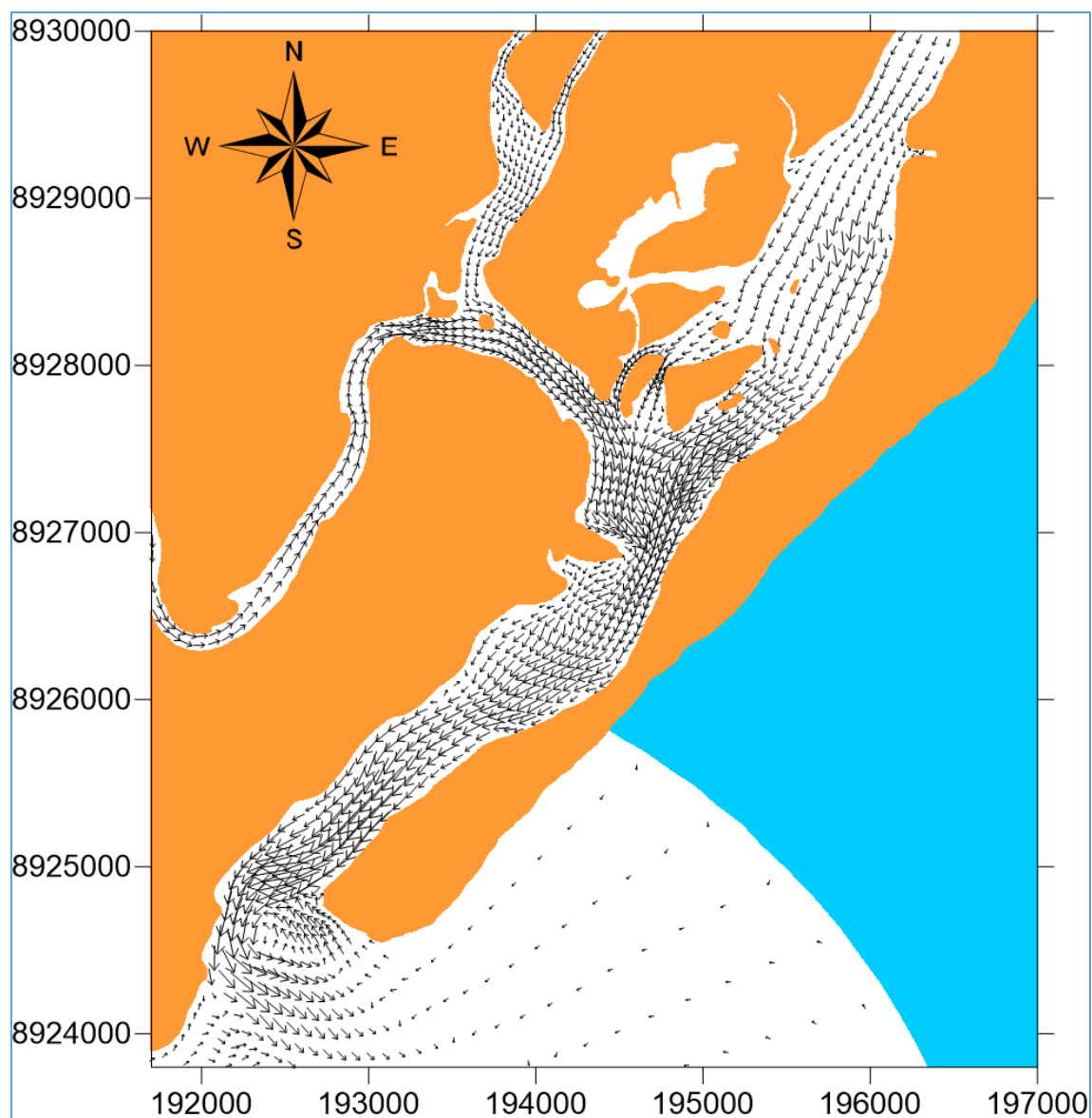


Figura 49 – Detalhe do campo de correntes residual, em m/s, na região dos canais, obtido numericamente pelo SisBaHiA®, considerando dois ciclos de maré no período de quadratura, em 07/10/2014.

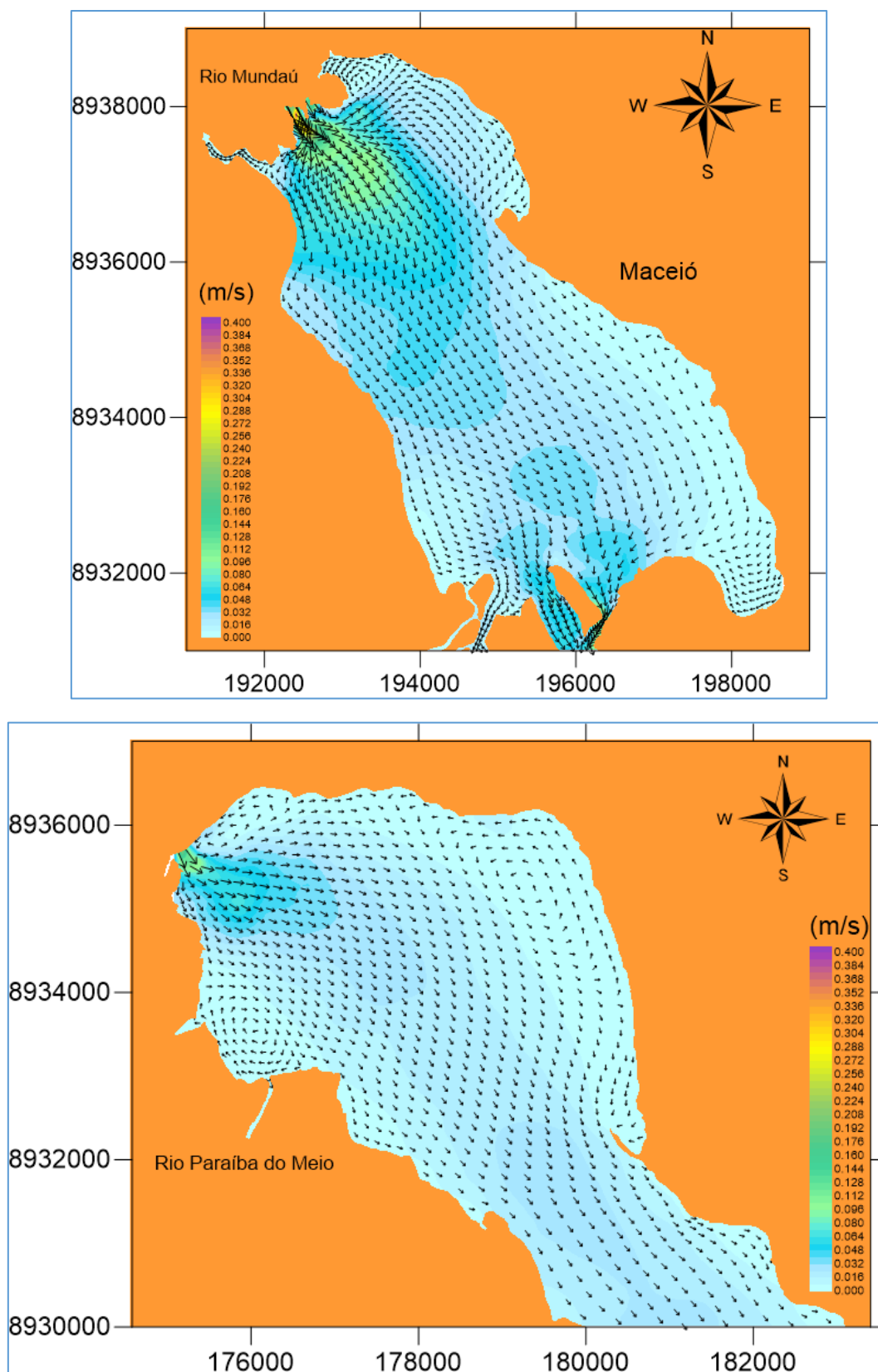


Figura 50 – Detalhe do campo de correntes residual, na região das Lagunas, obtido numericamente pelo SisBaHiA®, considerando dois ciclos de maré no período de quadratura, em 07/10/2014.

8. CONCLUSÃO

Os valores da posição da superfície livre, obtidos pelo modelo de circulação hidrodinâmicos do SisBaHiA®, apresentaram boa concordância com os valores medidos nas Lagunas Mundaú e Manguaba. Os valores da posição da superfície livre obtidas pelo modelo apresentavam, em sua maioria, o mesmo amortecimento das oscilações durante os períodos de quadratura e sizígia.

Os resultados do escoamento residual mostram uma tendência de vazante nos períodos simulados; os canais de ligação das lagunas com o mar possuem as maiores velocidades residuais, com valores de 0,35 m/s, no período de chuva. Este valor foi encontrado quando as vazões dos rios Mundaú e Paraíba do Meio apresentaram valores muito elevados, modificando de forma expressivas o escoamento residual nas lagunas e nos canais.

O escoamento residual evidencia a formação de vórtice próximo da embocadura dos canais de ligação das lagunas com o mar, para todos os períodos simulados, chuvoso e de estiagem. No período de estiagem há uma presença desses vórtices nas regiões mais no interior das lagunas e nos canais de ligação. No período chuvoso ocorre a ausência desses vórtices, ocasionados pelos grandes valores de vazões ocorridos no intervalo simulado.

As simulações do tempo de residência estão em conformidades com os resultados obtidos por Brito et al. (2018). As regiões onde ocorre a formação de vórtices também apresenta os maiores valores de tempo de residência. Nota-se também uma boa concordância em relação aos ciclos de marés que ocorrem nos períodos simulados, mostrando a influência nos movimentos das partículas dentro do CELMM.

Portanto, para os cenários propostos, é possível determinar diversas áreas que possam porventura sofrer descarte de efluentes líquidos ou qualquer tipo de poluente que adentre ao sistema, sendo regiões mais suscetíveis a problemas ambientais.

Para futuros trabalhos, seria de grande valor analisar e comparar diferentes pontos de inserção de poluentes para definir melhor as características da qualidade da água por parte do CELMM, e como o sistema irá depurar esses

poluentes. Juntamente com esse estudo há a necessidade de melhorar os dados de batimetria por parte da Laguna Manguaba, pois esses estão obsoletos. Outro ponto importante para futuros estudos seria estudar a dinâmica da embocadura, caracterizada por uma região de um alto índice de movimentação de massas, e qual a influência sobre a circulação nas lagunas.

9. REFERÊNCIAS

- Alves A. R.; Walsseman J. C..Estudos da variabilidade espaço-temporal do tempo de residência para o sistema lagunar de Saquarema-RJ". Mundo & Vida: Alternativas em Estudos Ambientais. 2002.
- Alves, M. C. "Composição e Acumulação da matéria Orgânica (C,N, Ligninas) nos sedimentos do sistema Lagunar Mundaú-Manguaba, Dissertação de Mestrado, Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal Fluminense, 2010.
- Amborsetti, W.; Barbanti, L.; Sala, N. Residence tmi and physical processes in lakes. Journal of Limnology. v.67, p. 1-15, 2003.
- ANA. Elaboração do Plano de Ações e Gestão Integrada do Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú-Manguabá – CELMM. PROJETO PROÁGUA/SEMI-ÁRIDO, 2006
- BRITO, A. N., FRAGOSO, C. R., LARSON, M. Tidal exchange a choked coastal lagoon: A syudy of Mindaú Lagoon in northeastern Brazil, Regional Studies in Mairne Science,7, pp. 133 – 142, 2018.
- Dalazen, J. P. Modelagem Numérica da Renovação das Águas no Complexo Estuarino de Paranaguá. Dissertação de Pós-Graduação, Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.
- De Lima, A. C. C. Condições Hidrodinâmica e estimativas do tempo de residência no Complexo Estuarino Lagunar Mundaú/Manguaba (AL) através de modelagem computacional. Dissertação de Mestrado, Departamento de Meteorologia/CCEN/ ICAT, Universidade Federal de Alagoas, 2007.
- Junior, E. C. (2018). Anáslie Dos Efeitos Da Variação Sazonal Da População Sobre A Qualidade Da Água Da Baía De Guaratuba. Projeto de Graduação, Universidade Federal do Paraná.
- Larsson, L., Nilsson, S. (2014). Hydrodynamic Modeling of the Mundaú Manguaba Estuarine-Lagoon System, Brazil. Division of Water Resources Engineering, Department of Building and Environmental Technology.
- Lins, R. C., Junior, C. R. F., Cirilo, J. A. (2013). Simulações da Hidrodinâmica no Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguab- CELMM/AL. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Associação Brasileira de Recursos Hídricos.
- Lopes, G. M. (2010). Aplicação de um moldeo numérico hidrodinâmico para as baías de Paranaguá e Antonina-PR. Tese de Mestrado, Pós-Graduação em Sistamas Costeiros e Oceânicos da Universidade Federal do Paraná.
- Mantovanelli, A., Marone, E., da Silva, E. T., Lautert, L.F., Klingenfuss, M. S., Prata, V. P., Noernberg, M. A., Knoppers, B. A., e Ângulo, R. J (2014). Combined Tidal Velocity And Duration Asymetries As A Determinant Of Water Transort And

Residual Flow In Paranaguá Bay Estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 59(4):523-537.

Mclusky, D.S., Elliott, M. *The Estuarine Ecosystem; Ecology, Threats And Management*, 3. Ed. Oxford University Press, Oxford, 216 Pp, 1981.

Miranda, L. B.; Castro, B. M.; Kjerfve, B. *Princípio De Oceanografia Física De Estuários*. Ed. Usp- São Paulo, Pp 34 – 46, 2002.

Oliveira, A. M. & Kjerfve, B. Environmental Response Of A Tropical Lagoon System To Hydrological Variability: Mundaú-Manguaba, Brazil. *Estuarine. Coastal And Shelf Science* 37, (6), Pp. 575-591, 1993.

Ponte, L. P., Carneiro, A. (2018). *Análise Da Taxa De Renovação E Odade Da Água Do Sistema Estuarino Da Baía De Guanabara*. Projeto de Graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Plano Municipal de Saneamento Básico de Maceió (2018). *Cartilha do Saneamento Básico*. Prefeitura de Maceió Desenvolvimento territorial e Meio Ambiente.

Rosersi, F. (2012). *Estudo Hidrodinâmico E De Renovação Das Águas Do Sistema Estuarino De Santos*. Tese de mestrado, Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

ROSMAN, P. C. C. *Referência técnica do SisBaHiA®*. Rio de Janeiro: Escola Politécnica e da Área de Engenharia, 2019.

ZIMMERMAN, J. T. F. (1988). Estuarine residence Times. *Hydrodynamics of Estuaries*.1