

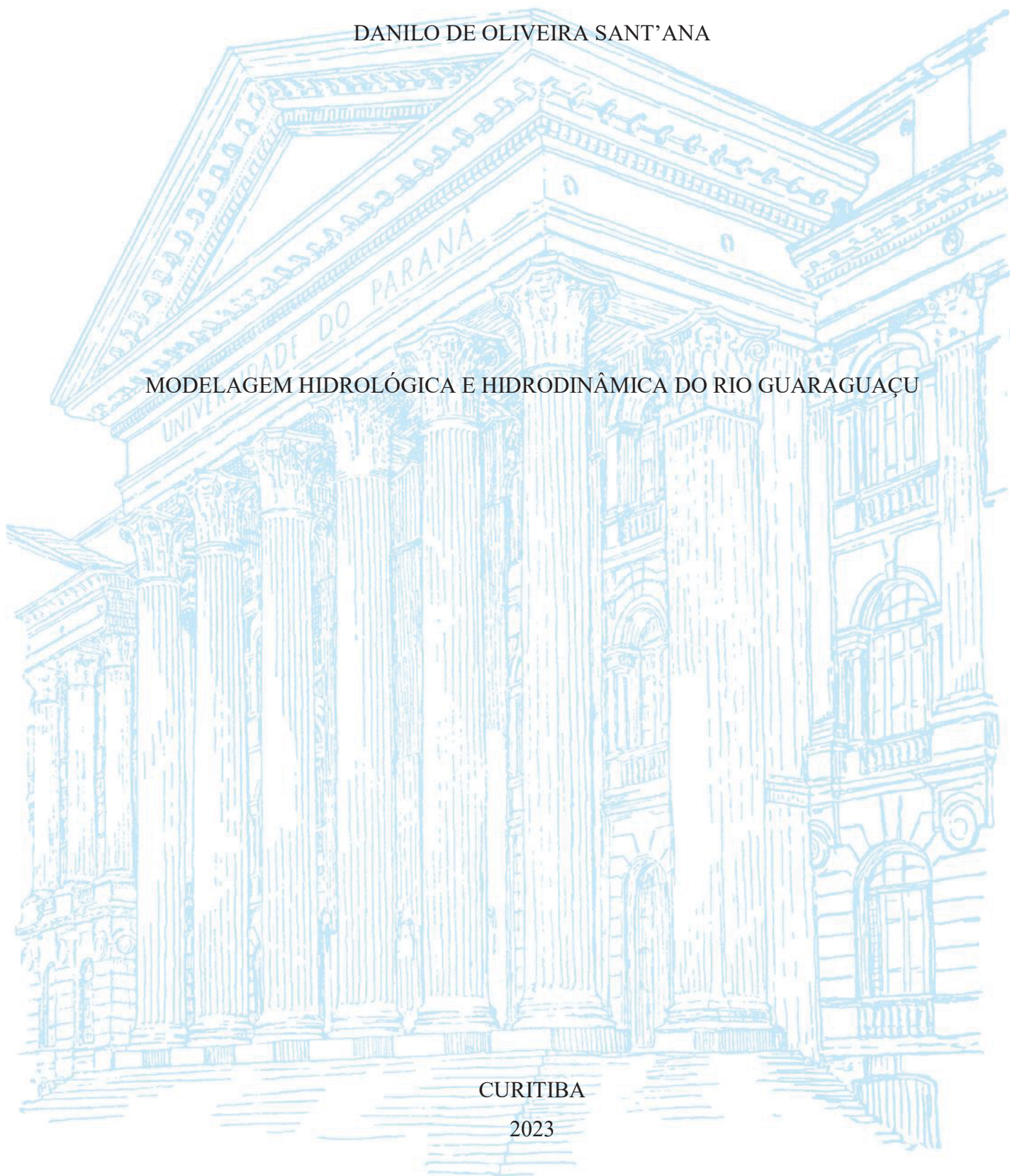
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

DANILO DE OLIVEIRA SANT'ANA

MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA DO RIO GUARAGUAÇU

CURITIBA

2023



DANILO DE OLIVEIRA SANT'ANA

MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA DO RIO GUARAGUAÇU

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientadora: Profa. Dra. Cynara de L. da N. Cunha

CURITIBA

2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Sant'ana, Danilo de Oliveira
Modelagem hidrológica e hidrodinâmica do Rio Guaraguaçu / Danilo de
Oliveira Sant'ana. – Curitiba, 2023.
1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de
Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental.

Orientador: Cynara de Lourdes da Nóbrega Cunha

1. Hidrodinâmica. 2. Hidrologia. I. Universidade Federal do Paraná. II.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. III. Cunha, Cynara
de Lourdes da Nóbrega. IV . Título.

Bibliotecário: Leticia Priscila Azevedo de Sousa CRB-9/2029



TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **DANILO DE OLIVEIRA SANT'ANA** intitulada: **MODELAGEM HIDROLOGICA E HIDRODINÂMICA DO RIO GUARAGUAÇU**, sob orientação da Profa. Dra. CYNARA DE LOURDES DA NÓBREGA CUNHA, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 16 de Novembro de 2023.

Assinatura Eletrônica

17/11/2023 09:04:44.0

CYNARA DE LOURDES DA NÓBREGA CUNHA

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

27/11/2023 17:37:47.0

JOSÉ EDUARDO GONÇALVES

Avaliador Externo (INSTITUTO TECNOLÓGICO SIMPAR)

Assinatura Eletrônica

17/11/2023 09:48:55.0

MAURÍCIO FELGA GOBBI

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, desejo expressar minha gratidão à minha orientadora, a Dra. Cynara, que ao longo de mais de cinco anos de orientação se transformou em uma grande amiga. Sua paciência diante das minhas dúvidas e seu apoio constante foram importantes para mim

Gostaria de agradecer aos meus pais que mantiveram comigo nessa jornada, tendo paciência nas horas de conflitos e me apoiando nas minhas decisões. Um agradecimento especial à minha namorada, Ana Maria, que sempre confiou em mim, sempre me apoiou e sempre tentou entender sobre o que eu estava estudando, mesmo não sendo da sua área.

Gostaria de agradecer aos meus amigos em geral que me ajudaram nas horas difíceis.

Quero agradecer aos professores Dr. Renata Ruaro, Dr Jean Vitule, Dr Michael Mannich e Dr André Padiál que me ensinaram muito sobre o Rio Guaraguaçu e me ajudaram no projeto e na campanha de campo para as minhas medições. Gostaria de agradecer também o professor Dr. José Eduardo que disponibilizou os equipamentos para a campanha de campo.

Gostaria de agradecer por último ao CNPq pelo financiamento através da concessão da bolsa de estudo, o que manteve possível a realização desse projeto.

O sorriso é a única língua que todos entendem. (Emicida, 2020.)

RESUMO

A bacia do rio Guaraguaçu, inserida na Bacia Hidrográfica Litorânea do Paraná, abrange uma área de 311 km². O rio Guaraguaçu enfrenta desafios ambientais, como efluentes de drenagem urbana provenientes da cidade de Pontal do Paraná, além da presença de espécies invasoras, como as *Urochloa arracta*. Este contexto motivou a realização de um acoplamento de modelos hidrodinâmicos e hidrológicos em dois cenários distintos, visando mensurar a intrusão salina e os processos de renovação das águas no rio Guaraguaçu. A modelagem hidrológica foi realizada a partir do modelo Soil & Water Assessment Tool (SWAT), com o período de calibração para o ano hidrológico de 08/2008 a 07/2009, obtendo resultados satisfatórios. A definição dos cenários de modelagem hidrodinâmica foi feita a partir dos dados hidrológico, sendo o cenário seco para o mês de 07/2022 e o cenário chuvoso para o mês de 02/2020. O acoplamento entre os modelos hidrodinâmicos foi entre o rio Guaraguaçu e o Complexo Estuarino de Paranaguá, com malhas sobrepostas. A elevação da superfície livre foi o principal forçante para o domínio simulado, tendo sua variação nas regiões mais internas do rio Cambará no cenário seco. No cenário chuvoso há um amortecimento dos valores da elevação da superfície livre, ocasionado pelo aumento das vazões. Os resultados mostram um comportamento de vazante em quase todas as regiões do domínio modelado. Somente a região mais próxima da embocadura, no cenário seco, teve comportamento de enchente nos períodos de sizígia. Os valores do escoamento residual para um período de 48 horas, a sizígia e a quadratura apresentaram menores velocidades no cenário seco. A taxa de renovação e idade da água tiveram comportamento semelhante para os cenários, com menores valores no cenário chuvoso. O resultado do tempo de residência indica que, no cenário seco, as partículas não conseguem sair do domínio, enquanto para o cenário chuvoso, as partículas são mais facilmente transportadas, saindo do domínio.

Palavras chave: Hidrodinâmica, Taxa de Renovação, Idade da Água, Tempo de Residência, rio Guaraguaçu, SWAT, SisBaHiA[®], Hidrologia.

ABSTRACT

A Guaraguaçu River basin, located within the Paraná Coastal Hydrographic Basin, covers an area of 311 km². The Guaraguaçu River faces environmental challenges such as urban drainage effluents from the city of Pontal do Paraná and the presence of invasive species like *Urochloa arrecta*. This context motivated the coupling of hydrodynamic and hydrological models in two distinct scenarios to assess saline intrusion and water renewal processes in the Guaraguaçu River. Hydrological modeling was performed using the Soil & Water Assessment Tool (SWAT), calibrated for the hydrological year from 08/2008 to 07/2009, yielding satisfactory results. Hydrodynamic modeling scenarios were defined based on hydrological data, with a dry scenario for July 2022 and a rainy scenario for February 2020. The coupling between hydrodynamic models involved the Guaraguaçu River and the Paranaguá Estuarine Complex, with overlapping meshes. The free surface elevation was the main driver for the simulated domain, with its variation in the inner regions of the Cambará River in the dry scenario. In the rainy scenario, there was a damping of free surface elevation values due to increased flow rates. Results show a downstream flow behavior in almost all regions of the modeled domain. Only the region closest to the river mouth, in the dry scenario, exhibited a flood behavior during spring tide periods. Residual flow values for a 48-hour period during spring tide and neap tide showed lower velocities in the dry scenario. The water renewal rate and water age exhibited similar behavior for both scenarios, with lower values in the rainy scenario. The residence time result indicates that, in the dry scenario, particles cannot leave the domain, while in the rainy scenario, particles are more easily transported, exiting the domain.

Keywords: Hydrodynamics, Renewal Rate, Water Age, Residence Time, Guaraguaçu River, SWAT, SisBaHiA®, Hydrology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Localização da Bacia Hidrográfica do rio Guaraguaçu (Fonte: Adaptado IAT, 2023)	20
Figura 2 - Processos e forçantes locais e remotos na bacia de drenagem e no oceano adjacente, determinantes das características e da dinâmica do estuário (Miranda et al, 2002)	25
Figura 3 – Diagrama esquemático de um estuário de tipo cunha salina (Fonte: Miranda <i>et al.</i> , 2002)	26
Figura 4 – Distribuição longitudinal da salinidade e da circulação para um estuário parcialmente misturado (Fonte: Miranda <i>et al.</i> , 2002)	27
Figura 5 - Distribuição da salinidade num estuário verticalmente homogêneo (Miranda <i>et al.</i> , 2002)	27
Figura 6 – Localização e hidrografia da bacia do rio Guaraguaçu (Fonte: Adaptado IAT, 2020)	38
Figura 7 – Presença da espécie <i>Urochloa arracta</i> no rio Guaraguaçu e, em detalhe, fotos da região a 1,5 km da rodovia PR-407, sentido a embocadura. (Fonte: Autor)	39
Figura 8 - Esquema das etapas de construção dos modelos (Fonte: Autor)	40
Figura 9 – Esquema representativo da bacia do rio Guaraguaçu com os valores da área de drenagem dos rios (Fonte: Autor)	43
Figura 10 – Esquema representativo da bacia do rio Guaraguaçu com os valores das cotas máximas e mínimas dos rios (Fonte: Autor)	43
Figura 11 – Esquema representativo da bacia do rio Guaraguaçu com os valores das extensões dos rios (Fonte: Autor)	44
Figura 12 – Modelo digital do terreno da bacia hidrográfica do rio Guaraguaçu (Fonte: IAT, 2023)	45
Figura 13 - Uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do rio Guaraguaçu. (Fonte: IAT, 2020)	47
Figura 14 – Tipo do solo da região da bacia hidrográfica do rio Guaraguaçu. (Fonte: IAT, 2023)	49
Figura 15 – Localização dos dados meteorológicos usadas na modelagem hidrológica (Fonte: Autor)	50
Figura 16 – Série diária de temperatura máximas e mínimas extraída da base de dados PowerData. (Fonte: NASA, 2023)	50

Figura 17 – Série diária de Umidade relativa extraída da base de dados PowerData. (Fonte: NASA, 2023)	51
Figura 18 – Velocidade do vento à 10,0 m extraída da base de dados PowerData. (Fonte: NASA, 2023)	51
Figura 19 – Radiação Solar extraída da base de dados PowerData. (Fonte: NASA, 2023)	51
Figura 20 – Acumulados diários de precipitação na estação ETE SANEPAR – Matinhos (Fonte: Adaptado SNIRH, 2023).	52
Figura 21 – Médias mensais de precipitação para um ano hidrológico na estação ETE SANEPAR – Matinhos (Fonte: Autor).	52
Figura 22 – Comparação entre os valores de precipitação entre as duas bases de dados utilizadas.(Fonte: Autor).....	54
Figura 23 – Valores diários de vazão na estação ETA-Matinhos (8222000) (Fonte: Adaptado SNIRH, 2023).	56
Figura 24 – Sub-bacias da bacia do rio Guaraguaçu, com os canais de drenagem (Fonte: Autor).....	58
Figura 25 – Pontos de medição e valores de profundidade medidos na campanha de campo com detalhe para a região próxima a volta grande (Fonte: Autor).....	64
Figura 26 – Curva de maré prevista para o 12 julho de 2022, obtida a partir das constantes harmônicas definidas por simulação hidrodinâmica do Complexo Estuarino de Paranguá a jusante do rio Guaraguaçu. Fonte: Adaptado Polli et. al (2021).	64
Figura 27 – Pontos de medição, valores de salinidade e horário das medições realizadas no rio Guaraguaçu na campanha de campo. (Fonte: Autor)	65
Figura 28 – Malha de elementos finitos para o CEP (Fonte: Adaptado Polli, 2021)	67
Figura 29 – Malha de elementos finitos no domínio de modelagem do rio Guaraguaçu e afluentes (Fonte: Autor).....	68
Figura 30 – Visualização da malha de elementos finitos em algumas regiões do domínio, sendo a) região da embocadura, b) confluência dos rios Guaraguaçu, Cambará e Pery e c) região conhecida como Caxetal (Fonte: Autor).	68
Figura 31 – Isolinhas da topografia de fundo, em metros (Fonte: Autor).	69
Figura 32 – Perfil longitudinal dos valores de cota de fundo em relação ao nível médio do mar para o rio Guaraguaçu (Fonte: Autor).....	70
Figura 33 - Série diária de altura de chuva para o mês de fevereiro/2020 medida na estação ETA-Matinhos (Fonte: Autor).....	72

Figura 34 – Série diária de altura de chuva para o mês de julho/2022 medida na estação ETA-Matinhos (Fonte: Autor)	72
Figura 35 – Altura de chuva medida e valores diários de vazões calculadas pelo SWAT para o período de calibração (Fonte: Autor).....	74
Figura 36 –Valores diários de vazões calculadas pelo SWAT para rios pertencentes a bacia do rio Guaraguaçu, com destaque para os períodos usados na modelagem hidrológica (Fonte: Autor).	75
Figura 37 – Vazões médias mensais calculadas pelo SWAT para rios pertencentes a bacia do rio Guaraguaçu entre agosto de 2008 e dezembro de 2022(Fonte: Autor). ...	75
Figura 38 - Altura de chuva medida e valores diários de vazões calculadas pelo SWAT nos rios pertencentes a bacia do rio Guararguaçu no cenário chuvoso, fevereiro de 2020 (Fonte: Autor).	76
Figura 39 – Altura de chuva medida e valores diários de vazões calculadas pelo SWAT nos rios pertencentes a bacia do rio Guararguaçu no cenário seco, julho de 2022 (Fonte: Autor).	77
Figura 40 – Valores de elevação da superfície livre (m) na embocadura do rio Guaraguaçu, em julho de 2022 (Fonte: Autor).....	78
Figura 41 – Valores de salinidade (ups) na embocadura do rio Guaraguaçu, em julho de 2022 (Fonte: Autor).	78
Figura 42– Valores de elevação da superfície livre (m) na embocadura do rio Guaraguaçu, em fevereiro de 2020 (Fonte: Autor).	79
Figura 43 – Valores de salinidade (ups) na embocadura do rio Guaraguaçu, em fevereiro de 2020 (Fonte: Autor).	79
Figura 44 – Localização das estações de monitoramento do modelo hidrodinâmico do rio Guaraguaçu e Cambará. (Fonte: Autor).....	80
Figura 45 - Elevação da superfície livre para as estações de monitoramento da modelagem hidrodinâmica do rio Guaraguaçu no período de sizígia no cenário seco (Fonte: Autor).	81
Figura 46 - Elevação da superfície livre para as estações de monitoramento da modelagem hidrodinâmica do rio Guaraguaçu no período de quadratura no cenário seco (Fonte: Autor).	81
Figura 47 - Elevação da superfície livre para as estações de monitoramento da modelagem hidrodinâmica do rio Guaraguaçu no período de sizígia no cenário chuvoso (Fonte: Autor).	82

Figura 48 - Elevação da superfície livre para as estações de monitoramento da modelagem hidrodinâmica do rio Guaraguaçu no período de quadratura no cenário chuvoso (Fonte: Autor).....	82
Figura 49 - Série temporal da elevação da superfície livre para as estações A e Z, indicando diferentes momentos, baixa-mar (verde), meia maré de enchente (azul) e preamar (vermelho) no cenário seco (Fonte: Autor).	83
Figura 50 – Perfil longitudinal da linha d’água em instantes de baixamar (verde), meia maré de enchente (azul) e preamar (vermelho) no cenário seco.. (Fonte: Autor)...	83
Figura 51 - Série temporal da elevação da superfície livre para as estações A e Z, indicando diferentes momentos, baixamar (verde), maré de enchente (azul) e preamar (vermelho) no cenário chuvoso (Fonte: Autor).	84
Figura 52 – Perfil longitudinal para baixamar (verde), meia maré de enchente (azul) e preamar (vermelho) no cenário seco (Fonte: Autor).	84
Figura 53 – Valores de vazão no período de sizígia nas seções transversais correspondentes as estações de monitoramento no período seco (Fonte: Autor).	85
Figura 54 - Série temporal para os valores de vazão no período de quadratura nas seções transversais próximas as estações de monitoramento no período seco (Fonte: Autor).....	86
Figura 55 - Série temporal para os valores de vazão no período de sizígia nas seções transversais próximas as estações de monitoramento no período chuvoso (Fonte: Autor).	86
Figura 56 - Série temporal para os valores de vazão no período de quadratura nas seções transversais próximas as estações de monitoramento no período chuvoso (Fonte: Autor).	87
Figura 57 – Localização das regiões para apresentação do escoamento residual e do campo de correntes (Fonte: Autor).	88
Figura 58 – Série de elevação da superfície livre com destaque para os intervalos em que o escoamento residual foi calculado para o cenário seco (Fonte: Autor).....	88
Figura 59 – Campo de correntes residuais, em m/s, na região A para o período de sizígia, considerando 48 horas a partir do dia 12/07/2022, no cenário seco (Fonte: Autor).....	89
Figura 60 – Campo de correntes residuais, em m/s, na região B para o período de sizígia, considerando 48 horas a partir do dia 12/07/2022, em destaque o ponto de inversão da corrente, no cenário seco (Fonte: Autor).	90

Figura 61 – Campo de correntes residuais, em m/s, na região C para o período de sizígia, considerando 48 horas a partir do dia 12/07/2022, no cenário seco (Fonte: Autor).....	91
Figura 62 – Campo de correntes residuais, em m/s, na região D para o período de sizígia, considerando 48 horas a partir do dia 12/07/2022, no cenário seco (Fonte: Autor).....	92
Figura 63 – Campo de correntes residuais, em m/s, na região A para o período de sizígia, considerando 48 horas a partir do dia 14/07/2022 , no cenário seco (Fonte: Autor).....	93
Figura 64 – Campo de correntes residuais, em m/s, na região B para o período de sizígia, considerando 48 horas a partir do dia 14/07/2022 , no cenário seco (Fonte: Autor).....	93
Figura 65 – Campo de correntes residuais, em m/s, na região C para o período de sizígia, considerando 48 horas a partir do dia 14/07/2022, no cenário seco (Fonte: Autor).....	94
Figura 66 – Campo de correntes residuais, em m/s, na região D para o período de sizígia, considerando 48 horas a partir do dia 14/07/2022 no cenário seco(Fonte: Autor).....	95
Figura 67 – Série de elevação da superfície livre com destaque para os intervalos em que o escoamento residual foi calculado para o cenário chuvoso (Fonte: Autor). ..	96
Figura 68 – Campo de correntes residuais, em m/s, na região A para o período de sizígia, considerando 48 horas a partir do dia 08/02/2020 no cenário chuvoso (Fonte: Autor).....	96
Figura 69 – Campo de correntes residuais, em m/s, na região B para o período de sizígia, considerando 48 horas a partir do dia 08/02/2020 no cenário chuvoso (Fonte: Autor).....	97
Figura 70 – Campo de correntes residuais, em m/s, na região C para o período de sizígia, considerando 48 horas a partir do dia 08/02/2020 no cenário chuvoso (Fonte: Autor).....	98
Figura 71 – Campo de correntes residuais, em m/s, na região D para o período de sizígia, considerando 48 horas a partir do dia 08/02/2020 no cenário chuvoso (Fonte: Autor).....	98

Figura 72 – Campo de correntes residuais, em m/s, na região A para o período de sizígia, considerando 48 horas a partir do dia 15/02/2020 no cenário chuvoso (Fonte: Autor).....	99
Figura 73 – Campo de correntes residuais, em m/s, na região B para o período de sizígia, considerando 48 horas a partir do dia 15/02/2020 no cenário chuvoso (Fonte: Autor).....	100
Figura 74 – Campo de correntes residuais, em m/s, na região C para o período de sizígia, considerando 48 horas a partir do dia 15/02/2020 no cenário chuvoso (Fonte: Autor).....	101
Figura 75 – Campo de correntes residuais, em m/s, na região D para o período de sizígia, considerando 48 horas a partir do dia 15/02/2020 no cenário chuvoso (Fonte: Autor).....	101
Figura 76 – Concentração de sal utilizada como condição inicial no modelo de qualidade da água para o cenário seco e chuvoso (Fonte: Autor).	103
Figura 77- Série temporal para a salinidade no cenário seco nas estações selecionadas (Fonte: Autor).....	104
Figura 78 – Isolinhas da salinidade em dois momentos das medições para o dia da campanha de campo (12/07/2022) (Fonte: Autor).	105
Figura 79 - Série temporal para a salinidade no cenário chuvoso para as estações selecionadas (Fonte: Autor).	106
Figura 80 - Isolinha de persistências de concentração de sal maior que 0,5 ups entre 01/07/2020 à	107
Figura 81 – Série temporal para a taxa de renovação da água para o cenário seco com 3 ciclos de modelagem (Fonte: Autor).....	108
Figura 82 - Série temporal para a taxa de renovação da água para o cenário chuvoso (Fonte: Autor).....	109
Figura 83 – Série temporal para idade da água para o cenário seco com 3 ciclos de modelagem (Fonte: Autor).	110
Figura 84 - Série temporal para idade da água para o cenário chuvoso (Fonte: Autor).	111
Figura 85 – Mapa das isolinhas do tempo de residência para o cenário seco com absorção nula e a posição das partículas no final da simulação (Fonte: Autor).....	112
Figura 86 – Mapa das isolinhas do tempo de residência para o cenário seco com absorção total e perfil longitudinal do tempo de residência ao final da simulação (Fonte: Autor).....	113

Figura 87 – Mapa das isolinhas do tempo de residência para o cenário chuvoso com absorção nula e perfil longitudinal do tempo de residência ao final da simulação

(Fonte: Autor). 114

Figura 88 – Mapa das isolinhas do tempo de residência para o cenário chuvoso com absorção total e perfil longitudinal dos resultados no instante final da simulação (Fonte:

Autor)..... 115

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização dos valores fisiográficos dos principais rios pertencentes a bacia do rio Guaraguaçu.	42
Tabela 2 – Porcentagem do uso e ocupação do solo na Bacia Hidrográfica do rio Guaraguaçu.	46
Tabela 3 – Tipos de solo na Bacia Hidrográfica do rio Guaraguaçu.	48
Tabela 4 - Chuva mensal acumulada para a estação ETE SANEPAR – Matinhos em ordem decrescente.	53
Tabela 5 - Parâmetros climáticos calculados a partir dos dados da estação climática.....	55
Tabela 6 – Dados da estação ETA- Matinhos (Colônia) localizado na bacia hidrográfica do rio Guaraguaçu.	56
Tabela 7 - Classificação dos critérios de calibração	58
Tabela 8 – Valores sugeridos para amplitude equivalente de fundo (Rosman, 2023), adaptado Abbot e Basco (1989).....	71
Tabela 9 – Cenários da modelagem hidrodinâmica e hidrológica.....	72
Tabela 10 – Esquema dos períodos dos dados para as estações utilizadas no estudo.	73
Tabela 11 - Parâmetros calibrados para o ponto de monitoramento.....	125
Tabela 12 - Exemplos de valores de condutividade hidráulica para vários materiais de leito (de Lane, 1983)	125

LISTA DE ABREVIACÕES OU SIGLAS

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

APA – Área de Proteção Ambiental

CEP – Complexo Estuarino de Paranaguá

CERH – Conselho Estadual de Recursos Hídricos

COPPE/UFRJ – Instituto Aberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro

DHN - Diretoria de Hidrografia e Navegação

ESEC - Estação Ecológica

ETA – Estação de Tratamento de Água

ETE – Estação de Tratamento de Esgoto

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations

HEC-HMS - Hydrologic Modeling System

HEC-RAS - Hydrologic Engineering Center-River Analysis System

HRU - Hydrologic Response Unit

IAT- Instituto de Água e Terra do Paraná

ITCG - Instituto de Terras, Cartografia e Geociências

JAXA - Japan Aerospace Exploration Agency

JAROS - Japan Resources Observation System Organization

ICMBio - Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade

LASB - Laboratório de Análise e Síntese em Biodiversidade

MDT – Modelo Digital do Terreno

NASA - National Aeronautics and Space Administration

NMM - nível médio do mar

NSE - Coeficiente de Nash-Sutcliffe

NRCS - Natural Resources Conservation Service

SisBaHiA® – Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental

SWAT - Soil & Water Assessment Tool

UNESCO - Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura

Pbias - Percentual de Tendência

PMSB - Plano Municipal de Saneamento Básico

RSR - Erro Padrão Normalizado

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
2 REVISÃO DE LITERATURA	24
2.1 INTRUSÃO SALINA.....	24
2.2 TAXA DE RENOVAÇÃO.....	29
2.3 ESCOAMENTO RESIDUAL.....	31
2.4 ACOPLAMENTO DE MODELOS HIDRODINÂMICOS DE DIFERENTES DIMENSÕES.....	32
2.5 MODELOS HIDROLÓGICOS.....	34
3 MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1 CARACTERIZAÇÃO ÁREA DE ESTUDO.....	37
3.2 ACOPLAMENTO DOS MODELOS.....	40
3.3 MODELAGEM HIDROLÓGICA.....	41
3.4 SISBAHIA®.....	59
3.5 CAMPANHA DE CAMPO.....	63
3.6 DADOS DO MODELO HIDRODINÂMICO.....	66
3.7 CENÁRIOS DE MODELAGEM.....	71
4 RESULTADOS	73
4.1 SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA.....	73
4.2 SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA.....	77
4.3 ESCOAMENTO RESIDUAL.....	87
4.4 SIMULAÇÃO QUALIDADE DA ÁGUA – SALINIDADE.....	102
4.5 MODELOS DE TRANSPORTE.....	107
5 CONCLUSÕES	116
6 REFERÊNCIAS	118
7 APENDICE	125

1 INTRODUÇÃO

Estuários são ambientes costeiros complexos, cuja compreensão dos seus processos físicos, como a hidrodinâmica, depende da análise detalhada de múltiplos fatores, como variações de maré, de chuva, ocupação urbana da bacia de contribuição e da diversidade dos ecossistemas. Esses ecossistemas desempenham um papel importante na preservação da biodiversidade marinha e na oferta de serviços ecossistêmicos, essenciais para a sociedade.

Para garantir a sustentabilidade desses sistemas, é necessária uma abordagem integrada, que compreenda tanto as questões relacionadas à preservação ambiental quanto as intervenções antrópicas para essas áreas.

A modelagem matemática surge como uma ferramenta capaz de responder aos desafios da gestão desses sistemas. A natureza dinâmica e complexa exige estudos que considerem as diferentes escalas temporais e espaciais em que esses processos ocorrem. A modelagem permite simular cenários e avaliar o impacto de intervenções humanas, ajudando na tomada de decisões direcionadas para a preservação e recuperação dessas regiões costeiras.

Neste contexto, o presente estudo tem como região de interesse a bacia do rio Guaraguaçu (Figura 1), localizada nas proximidades do Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP), no estado do Paraná, na região Sul do Brasil. Esta bacia tem uma área de aproximadamente de 311 km², e pertencente a bacia hidrográfica litorânea, uma das dezesseis bacias hidrográficas do Estado do Paraná, definida pela Resolução n° 024/2006/SEMA. Também é uma das dozes unidades hidrográficas de gerenciamento dos recursos hídricos, instituídas pela Resolução n° 049/2006/CERH.

O rio Guaraguaçu, afluente do Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP), passa por três municípios paranaenses, Matinhos, Paranaguá e Pontal do Paraná. Ela é a quarta maior sub bacia do Atlântico Sul Paranaense (ZEE, 2016), abrigando três unidades de conservação, PARNA de Saint-Hilaire/Lange, APA de Guaratuba e ESEC do Guaraguaçu, tendo em seu entorno com duas terras indígenas, a Sambaqui e Ilha da Cotinga (Ladeira, 2008).

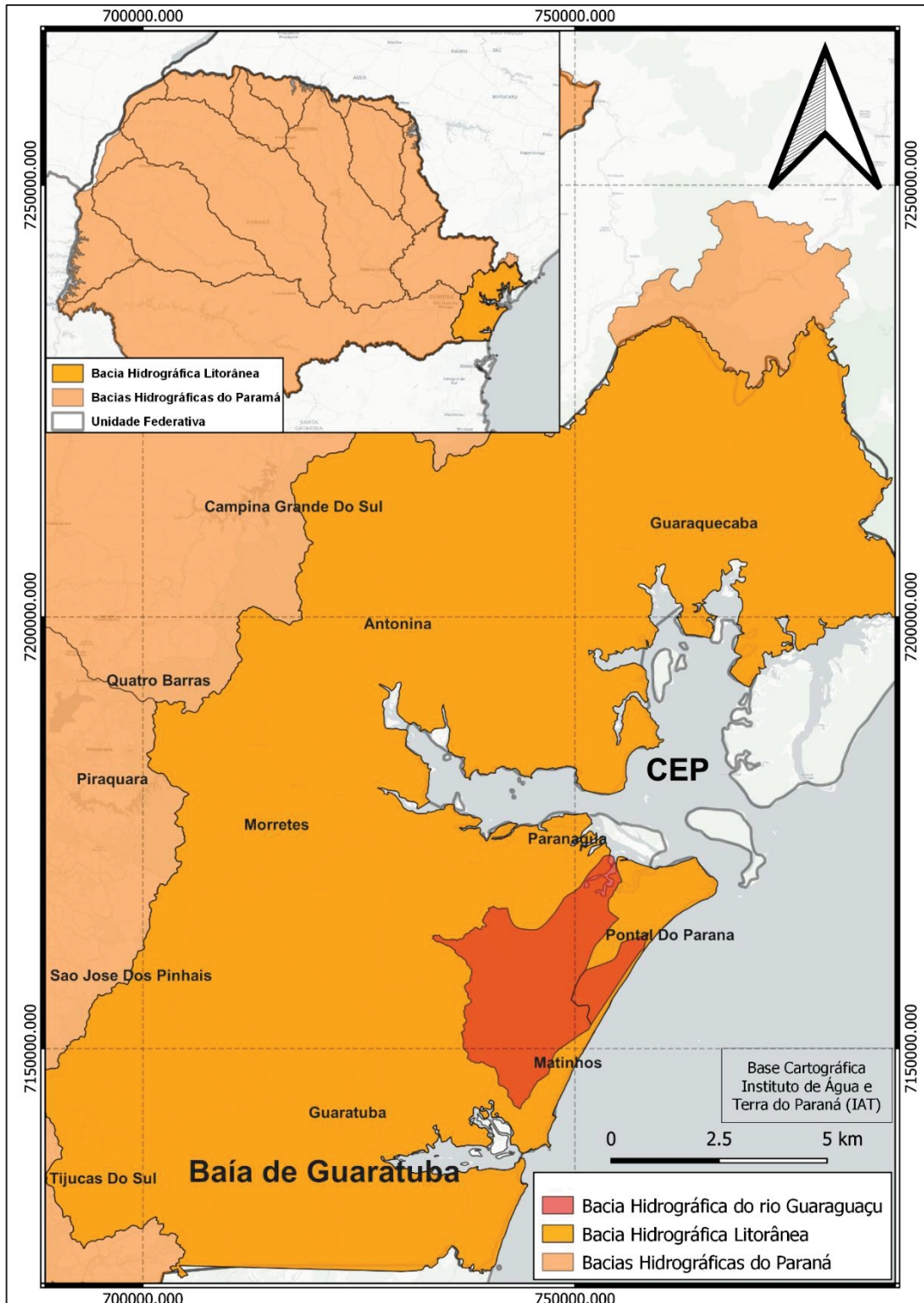


Figura 1– Localização da Bacia Hidrográfica do rio Guaraguaçu (Fonte: Adaptado IAT, 2023)

A bacia do rio Guaraguaçu abriga diferentes paisagens de formação pioneira de influência fluvial, como caixetais, brejos e várzeas (Bigarella, 2001; Ab’Saber, 2003). O rio Guaraguaçu tem papel fundamental para o abastecimento das cidades de Matinhos e Pontal do

Paraná, servindo também como manancial, corpo receptor e diluidor de efluentes domésticos destes municípios.

Um dos problemas biológico-ambiental existentes na bacia do rio Guaraguaçu é a pesca artesanal, tradicional na região, realizadas por mais de 50 comunidades pesqueiras, gerando um conflito ambiental entre esta atividade tradicional e a preservação da biota do rio (Andrighetto-Filho, 1993), onde espécies de peixes são mais exploradas que outras, causando assim um desequilíbrio trófico. Diante da importância da bacia do rio Guaraguaçu para a região e de sua complexidade, é necessário entender os processos físicos, químicos, bióticos e sua hidrodinâmica e como influenciam a qualidade da água, a distribuição das espécies invasoras, entre outros.

O principal forçante que influencia a hidrodinâmica nas regiões próximas à embocadura do rio Guaraguaçu é a maré, onde a oscilação da elevação da superfície livre ocasiona intrusão salina, caracterizada pela incursão da água salgada do CEP no rio Guaraguaçu, fenômeno que ocorre em ecossistemas costeiros e pode ser amplificado pela ação humana (Haddout et al, 2016). Sua importância reside nas variações das concentrações de sal que podem afetar tanto as comunidades biológicas como a qualidade das águas subterrâneas e as captações existentes no rio. Analisar esse fenômeno permite a delimitação de regiões que possam sofrer algum tipo de estresse hídrico. Como exemplo disso, períodos longos de estiagem que podem influenciar o avanço da cunha salina para regiões mais continentais (Kuijper e Van Rijn, 2011). Compreender a intrusão salina é importante para remediar impactos potenciais sobre os ecossistemas costeiros, auxiliando nas tomadas de decisões e planejamento.

Outros parâmetros para compreender como funciona a dinâmica desses sistemas são os valores que mensuram as trocas de água em um corpo hídrico, como Tempo de Residência, Idade da Água e Taxa de Renovação. Esses parâmetros podem representar a escala temporal em que as partículas ou substâncias permanecem dentro do sistema. Esses estudos desempenham um papel importante, fornecendo informações sobre a dinâmica das águas e permitindo a identificação de regiões de recirculação e zonas de estagnação. Esses resultados são necessários para entender como o corpo hídrico responde a diferentes cenários, fornecendo uma análise mais abrangente sobre os processos de mistura.

Ainda nesse contexto, a análise das correntes residuais define o comportamento de um sistema costeiro em diferentes ciclos da maré, possibilitando estabelecer se um sistema costeiro tem características de fluxo vazante ou enchente e regiões de recirculação (Lopes, 2010).

Considerando também a relevância da vazão fluvial como um forçante significativo na simulação hidrodinâmica de estuários, estudos que visam mensurar as vazões para diferentes

períodos podem auxiliar na construção mais assertiva de uma modelagem hidrodinâmica em um sistema costeiro. Dessa maneira, acoplar os modelos hidrológicos aos hidrodinâmicos se torna uma ferramenta útil na caracterização desses sistemas. Essa abordagem integrada permite a simulação de cenários mais realistas, possibilitando uma melhor compreensão da interação entre os processos hidrológicos e hidrodinâmicos e suas implicações na dinâmica do estuário.

A hipótese principal a ser analisada neste estudo é se as variações das vazões fluviais dos rios afluentes à bacia do rio Guaraguaçu modificam a intrusão salina e os processos de renovação. Isso fornece informações essenciais sobre os processos de mistura e o tempo que os constituintes permanecem retidos no rio, estabelecendo conexões entre as forçantes, marés e aporte fluvial, e suas possíveis influências nas áreas de estagnação.

Esse estudo propõe responder algumas questões, listadas a seguir:

- (1) Como a variação das vazões fluviais influencia a circulação hidrodinâmica e os processos de mistura no estuário do rio Guaraguaçu?
- (2) Como a intrusão salina é influenciada pelas variações de vazão?
- (3) Existem áreas de estagnação no sistema?
- (4) Qual a extensão do avanço da intrusão salina para diferentes cenários?
- (5) Em qual região ao longo do rio as variações de vazão são perceptíveis considerado a elevação da superfície livre?
- (6) Qual o comportamento das taxas de renovações para diferentes períodos hidrológicos?

O objetivo deste estudo é compreender as interações dos diferentes forçantes que atuam nos rios Guaraguaçu e Cambará. Para isso, é realizado um acoplamento das modelagens hidrodinâmicas e hidrológicas com os rios afluentes ao rio Guaraguaçu, e um acoplamento entre um modelo hidrodinâmico do CEP com o rio Guaraguaçu em dois cenários distintos, seco e chuvoso, para análise da intrusão salina, além do calcular a Taxa de Renovação, a Idade da Água e o do Tempo de Residência para o sistema. Os modelos utilizados nesse estudo foram o Sistema de Base Hidrodinâmica Ambiental (SisBaHiA) para os modelos hidrodinâmicos, qualidade da água e de transporte, e o SWAT (Soil & Water Assessment Tool) para a modelagem hidrológica.

Os objetivos específicos são:

- Coleta de dados ambientais e criação de uma base de informações georreferenciada para a bacia dos rios Guaraguaçu/Cambará;

- Realização da modelagem hidrológica das bacias de contribuição dos rios Guaraguaçu/Cambará para diferentes cenários, considerando períodos seco e chuvoso;
- Simulação da circulação hidrodinâmica do Complexo Estuarino de Paranaguá para diferentes períodos, gerando condições de contorno para a modelagem hidrodinâmica dos rios Guaraguaçu/Cambará;
- Definição da influência de diferentes forçantes na hidrodinâmica dos rios Guaraguaçu/Cambará;
- Análise da intrusão salina para dois cenários distintos, seco e chuvoso;
- Cálculo dos parâmetros de renovação nos rios Guaraguaçu/Cambará para dois cenários distintos, seco e chuvoso;
- Cálculo do escoamento residual nos rios Guaraguaçu/Cambará em diferentes condições ambientais;
- Definição das zonas de estagnação dos rios Guaraguaçu/Cambará.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 INTRUSÃO SALINA

Segundo Miranda et al. (2002), estuários são sistemas constituídos pela região onde ocorre a diluição da água do mar com a água doce continental. O balanço hídrico que ocorre em estuários depende das condições meteorológica, do uso e ocupação do solo, da cobertura vegetal, da ocupação urbana e das captações de água das regiões. Na Figura 2 são ilustradas as forçantes (Miranda et al., 2002) globais, continentais e oceânicas que influenciam na hidrodinâmica e nos processos de mistura que ocorrem no estuário. A seguir, eles são descritos brevemente:

- A radiação solar, que varia com a latitude geográfica e sazonalidade das estações do ano, controla a transferência de energia nos oceanos e das regiões costeiras, fonte de energia para o processo de fotossíntese (produção primária das plantas microscópicas - Fitoplâncton) e para o processo de evapotranspiração na bacia de drenagem;
- O vento promove a mistura das massas e a aeração em águas estuárias, podendo provocar erosões, gera gradientes verticais de salinidades e ondas de gravidades;
- A descarga fluvial e os gradientes longitudinais de salinidade favorecem os processos de mistura. As vazões dos rios afluentes aos estuários transportam sedimentos em suspensão, nutrientes orgânicos e inorgânicos;
- As variações da elevação da superfície livre, ocasionado pelas marés astronômicas, também influenciam nos processos de mistura, na circulação e nas concentrações de salinidade de um estuário, podendo também, em regiões que ocorrem inundações, proporcionar ambientes adequados para manguezais e outros tipos de vegetação que sobrevivam em ambientes salinos e salobros.

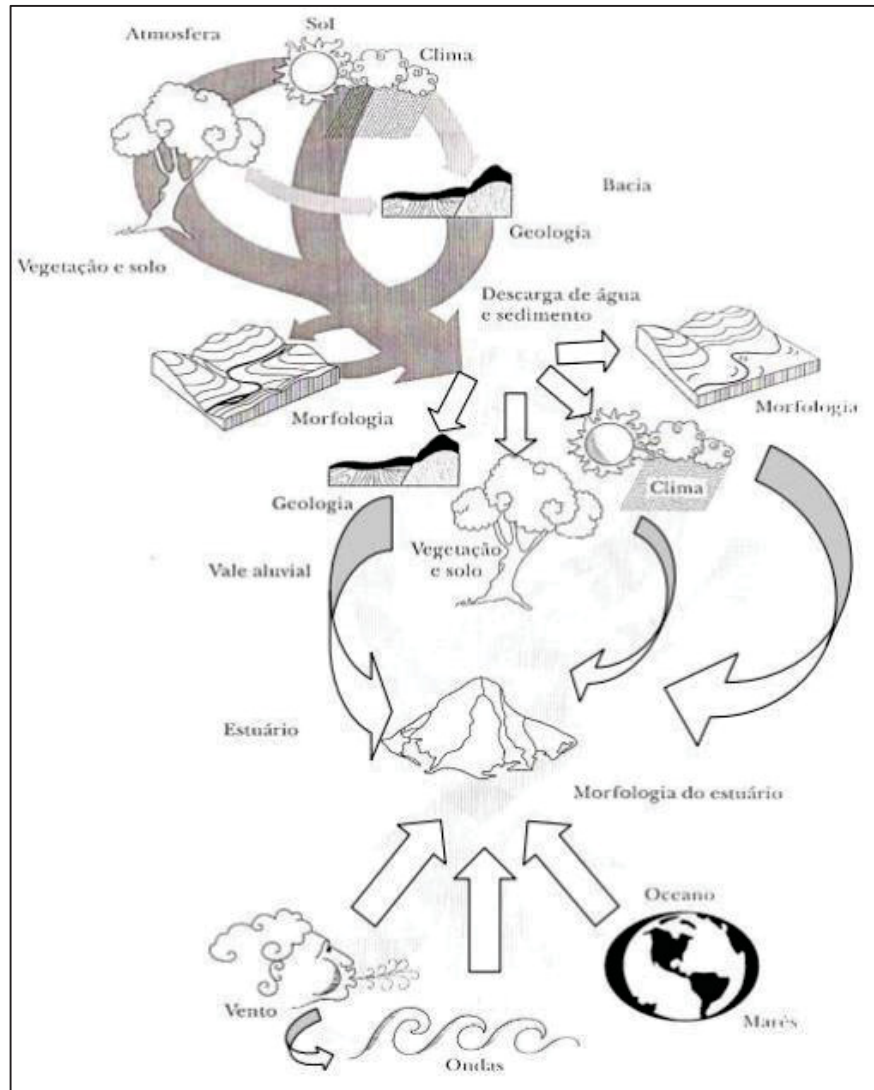


Figura 2 - Processos e forçantes locais e remotos na bacia de drenagem e no oceano adjacente, determinantes das características e da dinâmica do estuário (Miranda et al, 2002)

A intrusão salina, processo no qual ocorre a mistura da água doce (continental) e a água salgada (oceânica), é influenciada pela sazonalidade das vazões, da maré e do vento (Miranda et al. 2002). Considerando a mistura e a distribuição de sal, os estuários são classificados como estratificados, misturados ou parcialmente misturados.

Segundo Pritchard (1967) a classificação da estratificação de um estuário pode ser medida por um fator R_f (Simons, 1955), conhecido como razão de fluxo, que relaciona a entrada de água doce no sistema, a vazão do rio afluente (Qr), a duração do ciclo da maré (T) e o prisma de maré (P) que adentra ao sistema. O prisma de maré, por definição, é o volume de água do mar que adentra ao estuário durante um ciclo de maré, relacionado com a altura da maré.

$$R_f = Qr \cdot \frac{T}{P} = \frac{R}{P} \quad (1)$$

A variação do fator R_f indica a estratificação do sistema, sendo que para valores maiores ou iguais a 1,0, o sistema é estratificado, valores entre 1,0 e 0,25 caracterizam um sistema parcialmente misturados e para valores menores que 0,1, o sistema não apresenta estratificação.

Segundo Miranda *et al.* (2002) apud Pritchard (1955), é possível classificar os estuários de acordo com a estratificação vertical de salinidade, permitindo estabelecer assim as características da circulação da zona de mistura. São os seguintes tipos de estuários:

- **Cunha salina:** Esse estuário é típico de regiões de micromaré, tendo a altura máxima de maré é menor que 2 metros (Davies, 1964), e de lugares que apresentam grande descarga fluvial, onde o processo de entranhamento, é responsável pelo aumento da salinidade nas camadas. Nesse tipo de estuário a cunha salina está sempre buscando uma posição de equilíbrio em respostas as variações da descarga fluvial e da maré. A Figura 3 apresenta um esquema do estuário do tipo da cunha salina.

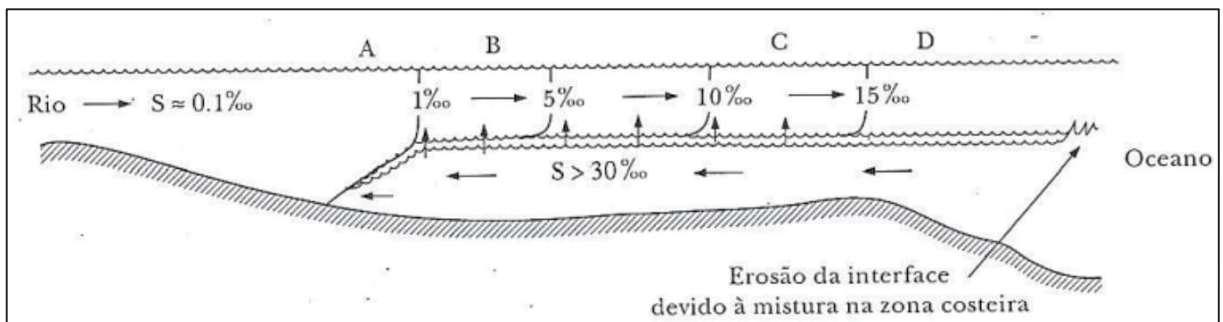


Figura 3 – Diagrama esquemático de um estuário de tipo cunha salina (Fonte: Miranda *et al.*, 2002)

- **Parcialmente misturado:** São classificados os estuários com cooscilações de maré, com a mistura acontecendo de forma periódica. Isto ocorre em estuários com pequenas alturas de maré (menor que 2 m) e com pequenas razões de fluxo (<1). Esse tipo de mistura contém gradientes de salinidade moderados. A Figura 4 ilustra um esquema de um estuário parcialmente misturado.

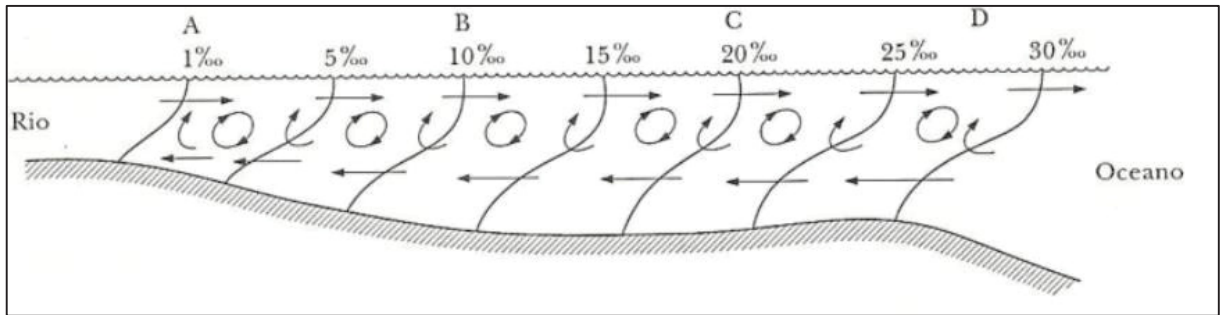


Figura 4 – Distribuição longitudinal da salinidade e da circulação para um estuário parcialmente misturado (Fonte: Miranda *et al.*, 2002)

- Verticalmente bem misturado: Forma-se em canais rasos e estreitos forçados por descarga fluvial pequena, apresentando pequena estratificação vertical de salinidade. O fluxo vertical de sal é desprezível e o processo de mistura ocorre principalmente na direção longitudinal (Figura 5).

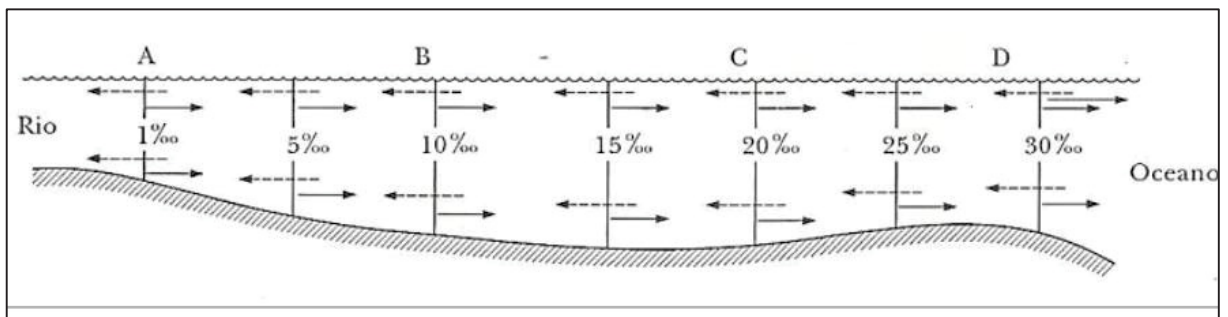


Figura 5 - Distribuição da salinidade num estuário verticalmente homogêneo (Miranda *et al.*, 2002)

Os estuários também podem ser classificados em função do grau de estratificação usando número de Richardson, que é razão entre a energia cinética causada pelas marés, e a flutuabilidade do meio, geradas devido às diferentes densidades entre a água doce e água do mar. O número de Richardson é definido como (Fischer *et al.*, 1972):

$$Ri = \frac{\Delta\rho \cdot g \cdot Qr}{\rho \cdot W \cdot Ut^3} \quad (2)$$

Onde g é a gravidade, $\Delta\rho$ é a diferença de densidade (salinidade) do fundo e da superfície, W é a largura do estuário, Qr é a vazão do rio e Ut é a velocidade longitudinal.

Quando o valor de Ri é maior que 0,8, o estuário é considerado estratificado, quando é menor que 0,08 o estuário é considerado bem misturado e quando está entre 0,8 e 0,08, o estuário é considerado parcialmente misturado.

Esse número pode representar também a competição entre a estratificação vertical e a mistura, desempenhando um papel importante para a dinâmica dos fluidos em geral e, em particular, na dinâmica estuarina (Miranda et al. 2002).

De acordo com Villars et al. (2001), as classificações tradicionais para diferenciar estuários e os processos de estratificação têm suas limitações. Geralmente, essas classificações se baseiam em estados estacionários, não considerando variações sazonais ou impactos decorrentes de condições meteorológicas, como a temperatura da água, ventos e outros fatores. Essa abordagem limitada pode levar a resultados não acurados e incompletos. Para uma compreensão mais abrangente, é necessário levar em consideração a variabilidade temporal e espacial. Portanto, é fundamental considerar não apenas as características estáticas, mas também as flutuações naturais que ocorrem ao longo do tempo e do espaço

O estudo da intrusão salina apresenta desafios consideráveis devido à complexidade dos processos que envolvem as escalas temporais e espaciais das concentrações de sal. Essas variações são influenciadas por diversos fatores, incluindo as estações do ano, os períodos de chuva ou seca, as marés, o vento e outros elementos.

A partir disso, busca-se atrelar esse processo aos rios afluentes no estuário, definindo regiões onde ocorre a intrusão salina, caracterizando a interação entre os rios afluentes e as águas oceânicas. Isso determinará regiões aptas para captação de água, regiões que abrigam espécies transitórias entre ambientes salobros, salinos e de água doce, definindo regiões onde existe a possibilidade de ocorrer infiltração de águas salobras em aquíferos, entre outros.

Muitos trabalhos dedicados ao estudo da intrusão salina em estuários e baías baseiam-se na modelagem numérica. Medeiros (2003) realizou estudos da intrusão salina no rio Itajaí-Açu, um estuário altamente estratificado, com auxílio do modelo criado por Paiva (1992), identificando a influência da batimetria no posicionamento da intrusão salina em dois cenários, um com uma vazão constante e outro com uma vazão variando, com diferentes batimetrias. Nesse estudo conclui-se que a intrusão salina e sua posição estão diretamente ligadas às variações batimétricas, favorecendo ou não uma posição mais avançada da cunha salina.

Haddout (2016) analisou o impacto da maré resultante com a combinação de um eclipse lunar total “*Supermoon*” na intrusão da salinidade, usando o estuário do rio Sebou (Marrocos) como área de aplicação. Utilizou-se de dois modelos: um analítico e outro computacional, o programa HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center River Analysis System*). O modelo foi calibrado e validado usando dados de campo e mostrou um bom ajuste entre os valores de salinidade calculados e medidos. Os resultados fornecem uma avaliação

rápida da distribuição de salinidade, ajudando a garantir a segurança do abastecimento de água durante um fenômeno astronômico pouco frequente.

Silva *et al.* (2018) realizaram estudo referente à intrusão salina no rio Cubatão utilizando o modelo HEC-RAS para cenários de desassoreamento. Foram analisados dois cenários mostrando a causa e o efeito da mudança do leito do rio, indicando uma maior intrusão salina quando há uma diminuição da profundidade do rio em períodos de maré de sizígia.

Amaral (2003) modelou a bacia do rio Macaé, com o programa SisBaHiA[®] e concluiu em seu estudo que a vazão fluvial, como forçante, não pode ser desconsiderada na análise da intrusão salina.

Estudos prévios sobre a circulação hidrodinâmica no rio Guaraguaçu são limitados. Puchalski (2021) realizou estudos referentes à hidrodinâmica e a intrusão salina no rio Guaraguaçu, tendo como foco a análise da dispersão da água de lastro na Baía de Paranaguá. O estudo indicou que a variação da salinidade é definida pela maré e pelo aporte fluvial.

E ainda, estudos sobre a distribuição de salinidade merecem destaque. Bora (2019) utiliza a distribuição de salinidade para analisar aspectos biológicos tanto para fauna e flora, indicando que as espécies estudadas dependem da concentração de sal na água. Contente *et al.* (2011) também analisaram a salinidade no rio Guaraguaçu, contudo relacionando com a assembleia de peixes e com os fatores abióticos.

2.2 TAXA DE RENOVAÇÃO

A capacidade de um corpo hídrico costeiro em ter suas águas “renovadas” depende dos processos de advecção e difusão. Através deles as massas de águas são transportadas para a região costeira adjacente e o tempo que uma partícula fica dentro de um estuário define qual a eficiência desse processo físico de renovação (Baleo *et al.* 2001). Existem diversos parâmetros que podem ser utilizados para definir os processos de renovação das águas em sistemas costeiros como o tempo de residência, o tempo de descarga hidráulica e a idade da água (Monsen *et al.*, 2002). Segundo Kenov *et al.* (2012), corpos hídricos com maiores taxas de renovação sofrerão menos problemas com a qualidade da água, uma vez a água ficaria um menor tempo dentro do sistema e teriam menor probabilidade de se agregar aos sedimentos e de depositar no fundo e contribuir com a eutrofização.

Cucco *et al.* (2006) definem o tempo de residência como a duração que uma partícula permanece dentro do corpo d’água em questão e permite uma estimativa de como os processos físicos, e os transportes advectivo e difusivo, agem dentro do sistema. A concepção padrão de

tempo de residência, definida como a razão entre volume do compartimento e o fluxo residual de água através do sistema, é demasiado simples para um estuário, pois são grandes as variações espaciais e de fluxo do sistema em várias regiões. Deste modo, faz-se melhor definir uma função de residência variável espacialmente, para condições de fluxos característicos de diferentes forçantes (Rosman, 2023).

Segundo Dalazen (2017), o tempo de residência ou tempo de descarga hidráulica trazem aplicabilidade em massa de água bem misturado, impossibilitando o uso em corpos mais heterogêneos, como sistemas costeiros de geometrias complexas.

A idade da água, definida por Rosman (2023), trata de estimar o tempo de decaimento de uma substância passiva marcadora de idade presente na água. Para Delhez (2006), distingue a idade da água pura da idade de constituintes presentes na água, definindo a idade da água como o tempo que esses constituintes levam para deixar o domínio modelado.

Vários estudos desenvolveram ou usaram metodologias para determinar o tempo de residência. Zimmermann (1998) mostrou que o tempo de residência é um parâmetro que analisa permanência de uma substância em um estuário ou laguna, antes de ser transportado ou consumido no ambiente.

Boynton et al. (1995) em seu estudo na Baía de Chesapeake (EUA), mostram a importância do tempo de residência como base para análises comparativas de processos ecológicos dos sistemas.

Monsen et al (2002) estudaram os processos de renovação da água no Delta de Sacramento–San Joaquin, identificando diferentes modos de se estudar esse processo. Nesse estudo definem o tempo de residência, idade da água e taxa de renovação como parâmetros comuns na análise dos processos físicos que ocorrem em um ambiente costeiro, mas alerta na definição desses parâmetros para estudos específicos.

França et al. (2020) estudaram a hidrodinâmica do reservatório de Acarape do Meio, localizado no município de Redenção, Ceará, com objetivo de calcular a taxa de renovação das águas e o tempo de residência do reservatório, utilizando o modelo 2DH do SisBaHiA.

Pinto et al. (2019) utilizaram o modelo MOHID para estimar o Tempo de Renovação da Água no Complexo Lagunar da Baixada de Jacarepaguá, Rio de Janeiro. O estudo revelou que a renovação da água varia consideravelmente nas diferentes regiões do complexo e que a maré controla a troca de água nas áreas próximas à saída do complexo, enquanto as áreas internas são mais influenciadas por fatores continentais.

Enquanto a Taxa de Renovação tende ao valor de 100%, e o alcança, caso o modelo seja executado por tempo suficiente, a Idade da Água converge para valores médios, em cada

local, em função das forçantes ambientais. Desta forma, a Idade da Água representa, em média, por quanto tempo as águas de um dado local estão dentro do domínio de modelagem.

2.3 ESCOAMENTO RESIDUAL

Nos sistemas costeiros as ondas de maré podem se comportar de formas distintas, dependendo das características morfológicas do local e dos efeitos que podem sofrer em virtude do atrito do fundo e das margens (Dyer, 1973). Conforme adentram para regiões mais internas tendem a amplificar sua amplitude (Masselink & Hughes, 2003). Com a redução das profundidades, diminuem as velocidades em regiões abertas dos estuários, gerando distorções nos tempos de enchentes e vazantes, fenômeno que é conhecido como assimetria de maré (Dronkers, 1986), e na presença de extensas áreas intermareais causa um espalhamento lateral da água sobre essas planícies, proporcionando uma defasagem nos picos de preamar.

A distorção assimétrica da onda de maré produz diferenças nas magnitudes e na duração das enchentes e vazantes, dependendo do gradiente horizontal do nível de água e da morfologia da região de escoamento (Lopes, 2010). Essas correntes, assim como as correntes residuais, provocam um papel importante na taxa de renovação de um sistema costeiro, controlando a importação ou exportação de nutrientes (LeHir et al., 2000).

Para o modelo utilizado nesse estudo, o SisBaHiA[®] define o campo de velocidades residuais com a integral do produto da altura de coluna d'água, com componentes das velocidades nas direções x e y :

$$U_R = \frac{\int_{t_0}^{t_0+T} (HU)dt}{\int_{t_0}^{t_0+T} Hdt}, V_R = \frac{\int_{t_0}^{t_0+T} (HV)dt}{\int_{t_0}^{t_0+T} Hdt} \quad (3)$$

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 de maré.

Dalazen (2020) estimou o escoamento residual, a idade da água e taxa de renovação para o Complexo Estuarino de Paranaguá, utilizando o SisBaHiA[®]. Foram utilizados os modelos hidrodinâmicos, calibrados com os dados medidos, mostrando que as vazões fluviais têm 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 et al. (2016) 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 no cálculo da taxa de renovação e o tempo de residência. Os resultados indicaram 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 por efeito das marés.

2.4 ACOPLAMENTO DE MODELOS HIDRODINÂMICOS DE DIFERENTES DIMENSÕES

O acoplamento de modelos é uma técnica de modelagem computacional aplicada em estudos complexos e multidisciplinares. Consiste na integração de diferentes modelos numéricos, cada um representando aspectos específicos do sistema em análise, permitindo a interação e troca de informações entre eles, gerando valores para as condições iniciais e de contorno entre si.

Em um contexto para os sistemas costeiro, um acoplamento pode abranger variáveis hidrodinâmicas, como correntes, níveis de maré e ondas, juntamente com variáveis hidrológicas, como escoamento de rios e descargas fluviais. Também podem ser incluídas variáveis ambientais, como a salinidade da água, temperatura, concentração de nutrientes e material particulado, além de vento, radiação solar e precipitação.

A modelagem bidimensional (2DH) de rios que desembocam em estuários e baías muitas vezes não é detalhada devido à complexidade no processamento de dados, isso ocorre especialmente quando a discretização espacial utilizada possui diferentes dimensões para representar regiões externas à baía e regiões mais internas, como rios e afluentes. A discrepância nas dimensões da discretização pode resultar em um alto custo computacional e um aumento no tempo de processamento, dificultando a realização de cenários de longo prazo em regiões costeiras, tornando o modelo pouco eficiente.

Os modelos unidimensionais (1D) permitem uma representação mais econômica e adequada de rios afluentes em regiões costeiras. São mais versáteis, o que facilita a resolução desse tipo de problema. Além disso, é possível realizar um acoplamento entre os modelos unidimensionais e bidimensionais, permitindo uma melhor definição das condições de contorno e uma maior precisão na simulação.

No entanto, é importante reconhecer que os modelos unidimensionais têm suas limitações na discretização de rios afluentes, sendo incapazes de representar características complexas, como zonas de estagnação, gradientes transversais, entre outros. Essa é uma

consideração relevante ao optar por usar um modelo unidimensional ou bidimensional, pois cada abordagem possui vantagens e desvantagens dependendo do contexto específico da simulação e qual escala espacial e temporal o estudo necessitará.

Alguns estudos como o de Pimentel (2006) relatam acoplamentos de modelos onde foi desenvolvido um modelo hidrodinâmico 1D com multi-calha, com alagamento lateral acoplando assim ao modelo 2DH para o Canal do Cunha utilizando o sistema SisBaHiA[®]. Nesse trabalho foi utilizada a metodologia apresentada por Reis Junior (1998), que desenvolveu um modelo usando o método do fatoramento implícito para a discretização temporal em conjunto com o método da substituição na equação da continuidade, que passa a ter somente a elevação como variável. A velocidade é calculada por substituições sucessivas dos valores na equação de quantidade de movimento.

Pimentel (2006), diferentemente de Reis Junior (1998), utiliza-se do desacoplamento das variáveis, onde a elevação e velocidade são resolvidas simultaneamente com uma rotina iterativa. Com suas modificações foram possíveis os estudos do alagamento lateral das seções transversais impostas no modelo. Nesse estudo foi realizado o processo inverso de acoplamento, utilizando ao modelo 2DH como dados de condição de contorno na modelagem 1D. O acoplamento do modelo foi realizado a partir da extrapolação da elevação no modelo 2DH, que transfere esses valores para o modelo 1D, que calcula os valores de vazão média e devolve esse valor no modelo 2DH, que associará a uma vazão a cada nó existente nas intermediações entre os dois modelos, corrigindo assim as velocidades nos nós. Iguchi (2006) utiliza-se desse modelo hidrodinâmico analisado por Pimentel (2006), no cálculo de concentrações de OD e DBO em um modelo de qualidade da água para o Canal do Fundão.

Twigt *et al.* (2009) analisaram um acoplamento de um modelo unidimensional (1D) com um modelo tridimensional (3D) no Delta do Rio das Pérolas. Os modelos utilizados nesse estudo foram o SOBEK (1D) e o Delft 3D (3D). A motivação do acoplamento é devido à característica da região, que apresenta uma extensa rede fluvial, que impossibilita uma modelagem tridimensional detalhada para regiões mais a montante dos rios afluentes. O modelo 1D utilizado permitiu uma representação realista dos afluentes a montante, considerando as características morfológicas da rede hidrográfica. Já o uso do modelo 3D permitiu uma representação realista da variabilidade que ocorrem nas três dimensões.

Lima (2016) realizou a modelagem hidrológica e hidrodinâmica acoplada para o prognóstico ambiental com diferentes cenários de mudança climática na Lagoa de Araruama, onde foram realizadas simulações hidrológicas e de qualidade da água. Nesse estudo foram utilizados os programas SisBaHiA[®] e o *Soil and Water Assessment Tool* – SWAT analisando

os anos 2013, 2030 e 2060. A sua análise mostra a importância de se estudar as variações que podem ocorrer devido às mudanças climáticas por ações antrópicas.

Em todos esses trabalhos nota-se que o acoplamento dos modelos facilita a implementação de condições de contorno e permitem discretizar domínios complexos com maior facilidade.

Nesse estudo a finalidade de se utilizar o acoplamento de modelos foi para a criação de dados de condição de contorno e iniciais. Dessa forma, por exemplo, possibilitou criar séries temporais de vazão que foram implementados como condição de contorno no modelo hidrodinâmico.

2.5 MODELOS HIDROLÓGICOS

Um modelo hidrológico é uma ferramenta de análise que visa a representação matemática simplificada de um sistema hidrológico real, com o propósito de apresentar e compreender o comportamento hidrológico de uma área de interesse específica. Ao reproduzir os processos físicos, esses modelos são designados modelos hidrológicos de base física. Essas representações matemáticas se baseiam em princípios físicos, como leis da conservação da massa e da energia, e permitem simular processos hidrológicos como escoamento superficial, infiltração, evapotranspiração e fluxo de água subterrânea (Ribeiro, 2021).

Segundo Santos (2018), os modelos hidrológicos podem ser divididos em distribuído, semi-distribuído e o concentrado. Os modelos distribuídos consideram que existe uma discretização espacial, onde a bacia hidrográfica é dividida numa grade de células quadradas ou retangulares no qual conseguem inserir diferentes valores aos parâmetros do modelo. Para o modelo semi-distribuído a bacia hidrográfica é dividida em várias sub-bacias ou unidade de menor dimensão, em que se admite a uniformidade espacial das suas características. Já o modelo concentrado considera uma bacia hidrográfica como uma unidade única de características uniformes, em que os parâmetros e as variáveis das bacias hidrográficas são representados por valor médio ou mediano que assume nessa unidade.

Os modelos podem variar na sua complexidade, tendo diferentes bases teóricas e dependem do problema avaliado e dos resultados esperados, considerando as escalas temporais e, se necessário, as escalas espaciais. Existindo a necessidade de uma avaliação das informações disponíveis ou da viabilidade de obtenção desses dados. Alguns modelos hidrológicos que são comumente utilizados:

- SWAT: Modelo hidrológico conceitual semi-distribuído e temporalmente contínuo, com as divisões feitas em sub-bacias que posteriormente são subdividas em Unidade de Respostas Hidrológicas (HRUs). Um dos usos desse modelo é simular diferentes usos de ocupação do solo, visando análise dos efeitos antrópicos na bacia (Arnold et al., 2012);
- WaterGAP3: Modelo conceitual, de balanço hídrico espacialmente distribuído, com resolução espacial em grade global de 5 arco-minutos;
- LISFLOOD: Modelo hidrológico de chuva-vazão que simula processos hidrológicos que ocorrem numa bacia hidrográfica; desenvolvido pelo grupo de pesquisas de inundações do Projeto de Riscos Naturais do *Joint Research Center* (JRC) da comissão Europeia (Van der Knijf et al., 2010);
- MGB (Modelo de Grandes Bacias); Modelo semi-distribuído, usado para bacias com área maior de 1000 km², sendo discretizada em Unidade de Respostas;
- O HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System*): que utiliza a abordagem de uma única estação para representar uma área maior, em oposição a um modelo distribuído que dividiria a bacia em várias sub-bacias. O HEC-HMS é usado para prever o comportamento hidrológico de sistemas fluviais, incluindo escoamento superficial, escoamento subterrâneo, e processos de transformação de chuva em vazão.

O acoplamento entre os modelos hidrológicos com hidrodinâmicos é utilizado em diferentes análises. Neto et al. (2014) realizaram uma modelagem hidrológica-hidrodinâmica com o auxílio dos programas *Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS) e o *Hydrologic Engineering Center-River Analysis System* (HEC-RAS), onde estudaram o evento pluviométrico ocorrido no ano de 2010 na bacia hidrográfica do Rio Una, localizado no estado de Pernambuco. Neste estudo foram realizadas as calibrações do modelo hidrológico e hidrodinâmico para eventos extremos.

Godoy (2009) estudou em diferentes cenários a hidrodinâmica da Lagoa da Conceição, localizada em Santa Catarina (SC), com diferentes vazões, onde uma dessas vazões implementadas na condição de fronteira, foi calculada a partir do modelo *Curve Number* do *Natural Resources Conservation Service* (NRCS) do Departamento de Agricultura dos Estados

Unidos. A modelagem hidrodinâmica foi realizada no programa MOHID, que indicou como as diferentes vazões influenciam a variação da superfície livre em diferentes pontos na lagoa.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nessa seção são apresentadas a área do estudo, os modelos hidrológico e hidrodinâmico e as condições de contorno e iniciais usadas. Os modelos utilizados foram o SisBaHiA[®] e o modelo *Soil and Water Assessment Tool* - SWAT.

3.1 CARACTERIZAÇÃO ÁREA DE ESTUDO

A bacia do rio Guaraguaçu possui uma área de 311,0 km², constituindo a quarta maior sub-bacia da Bacia Litorânea do Paraná (IAT, 2019). Sua rede de drenagem é composta por oito rios, sendo os principais os rios Guaraguaçu e Cambará. A partir dos arquivos disponibilizado pelo Instituto de Água e Terra do Paraná (IAT), foi definida a localização e a hidrografia da bacia do rio Guaraguaçu, mostrado na Figura 6¹. Os rios Guaraguaçu e o Cambará possuem as maiores extensões, funcionando como um corredor ecológico e servindo de base para o fluxo gênico e a saúde de diversas comunidades de animais e plantas (Elste, 2021). A bacia do rio Guaraguaçu possui diferentes tipos de declividade em seu território (Elset, 2021), classificada em sua maior parte como plana. A proximidade com a Serra da Prata faz com que a bacia do rio Guaraguaçu apresente declividades elevadas com altitudes de 1024,0 metros, causando um contraste na geomorfologia da bacia.

Em relação às características biológicas, o rio Guaraguaçu apresenta espécies invasoras, como a presença da *Urochloa arracta* (Bora, 2019), conhecida como braquiária. Essa espécie causa um desequilíbrio trófico para as espécies nativas da região, possuindo partes flutuantes e emergentes como folhas e hastes, causando a diminuição da incidência da radiação solar, dificultando assim os processos de fotossíntese e respiração dos organismos no rio Guaraguaçu/Cambará. Essa invasão é proeminente nos canais do rio Guaraguaçu, Pery e das Pombas, reduzindo a navegabilidade em alguns trechos dos rios. A Figura 7 indica as regiões onde ocorreram a presença dessa espécie no rio entre os anos de 2015 a 2023; em detalhe estão mostradas fotos referentes à seção localizada a 1,5 km da Rodovia PR-407, sentido embocadura do CEP.

¹ Os rios sem denominação foram nomeados como Afluentes1, Afluentes2, Afluentes3, Afluente 4 e Afluente montante.

Essas informações foram obtidas em campanhas de campo que ocorreram pelo projeto MADMACS, organizado pelo Laboratório de Análise e Síntese em Biodiversidade (LASB). Esse projeto além de georreferenciar os bancos de braquiárias ao longo do rio Guaraguaçu, observa a composição dos peixes, parasitas, composição das microalgas e zooplâncton, além de medidas abióticas como dados de qualidade da água (salinidade, Demanda Bioquímica de Oxigênio e Oxigênio Dissolvido).

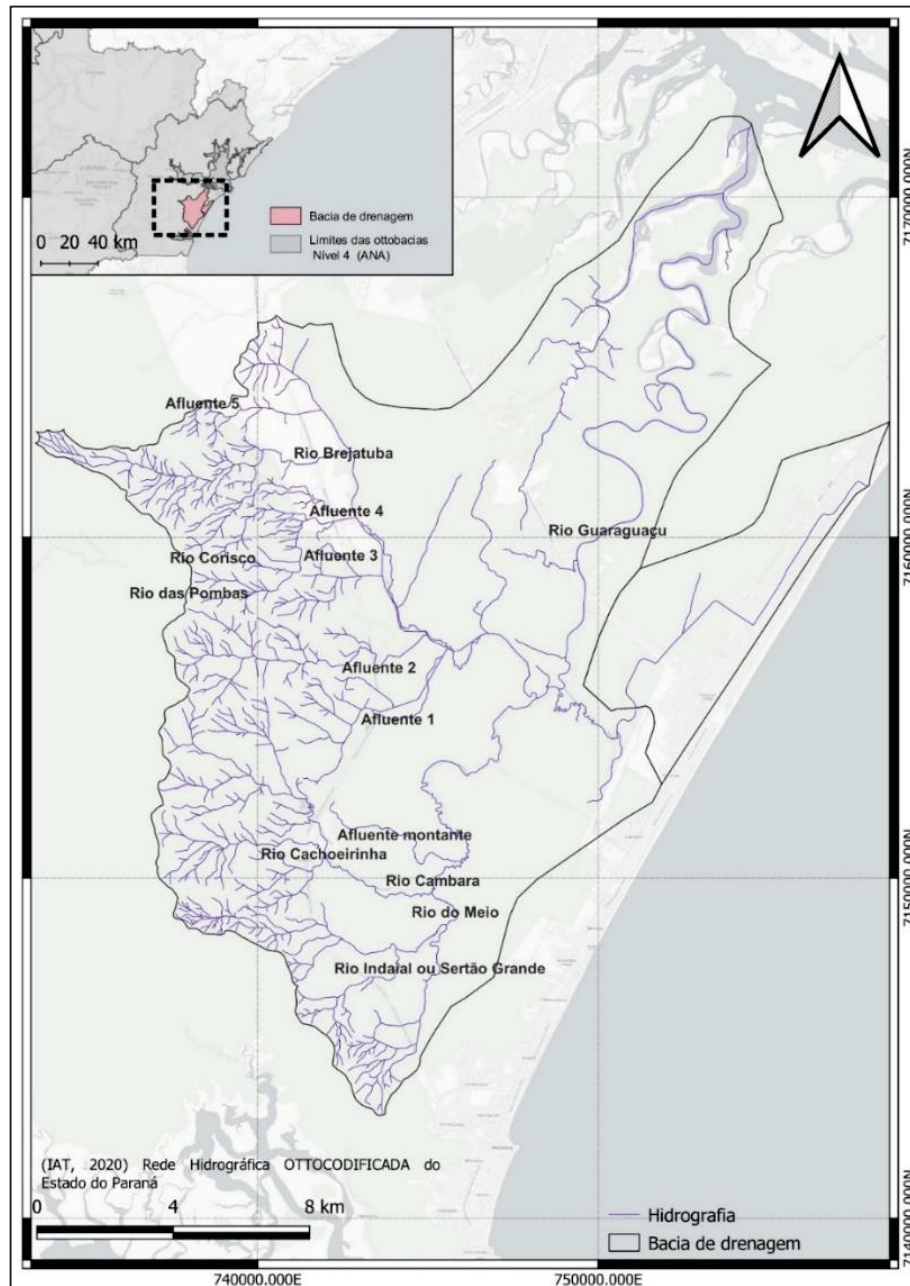


Figura 6 – Localização e hidrografia da bacia do rio Guaraguaçu (Fonte: Adaptado IAT, 2020)

Na confluência do rio Pery com o rio Guaraguaçu ocorre a maior presença de braquiária. Em alguns locais essa espécie causa o bloqueio total do rio, impossibilitando o acesso a regiões. Bora (2019) investigou a sobrevivência dessa espécie em regiões salinas no rio Guaraguaçu, indicando que a concentração de sal serve como um filtro para essa espécie. Concentrações maiores de sal não permitem o desenvolvimento da espécie, dificultando a formação das raízes e dos brotos.

Outra importante região da bacia do rio Guaraguaçu é a região denominada de Caxetal, da árvore caxeta (*Tabebuia cassinoides*). *Tabebuia cassinoides* é utilizada na fabricação de instrumentos musicais, lápis, canoas e outros utensílios. Nas margens dos rios Indaial e do Meio têm-se a presença dessa espécie. A preservação dessa região é importante considerando que os papagaios-de-cara-roxa nidificam nestas árvores, segundo o Plano de Ação Nacional para Conservação dos Papagaios da Mata Atlântica (ICMBio, 2011).

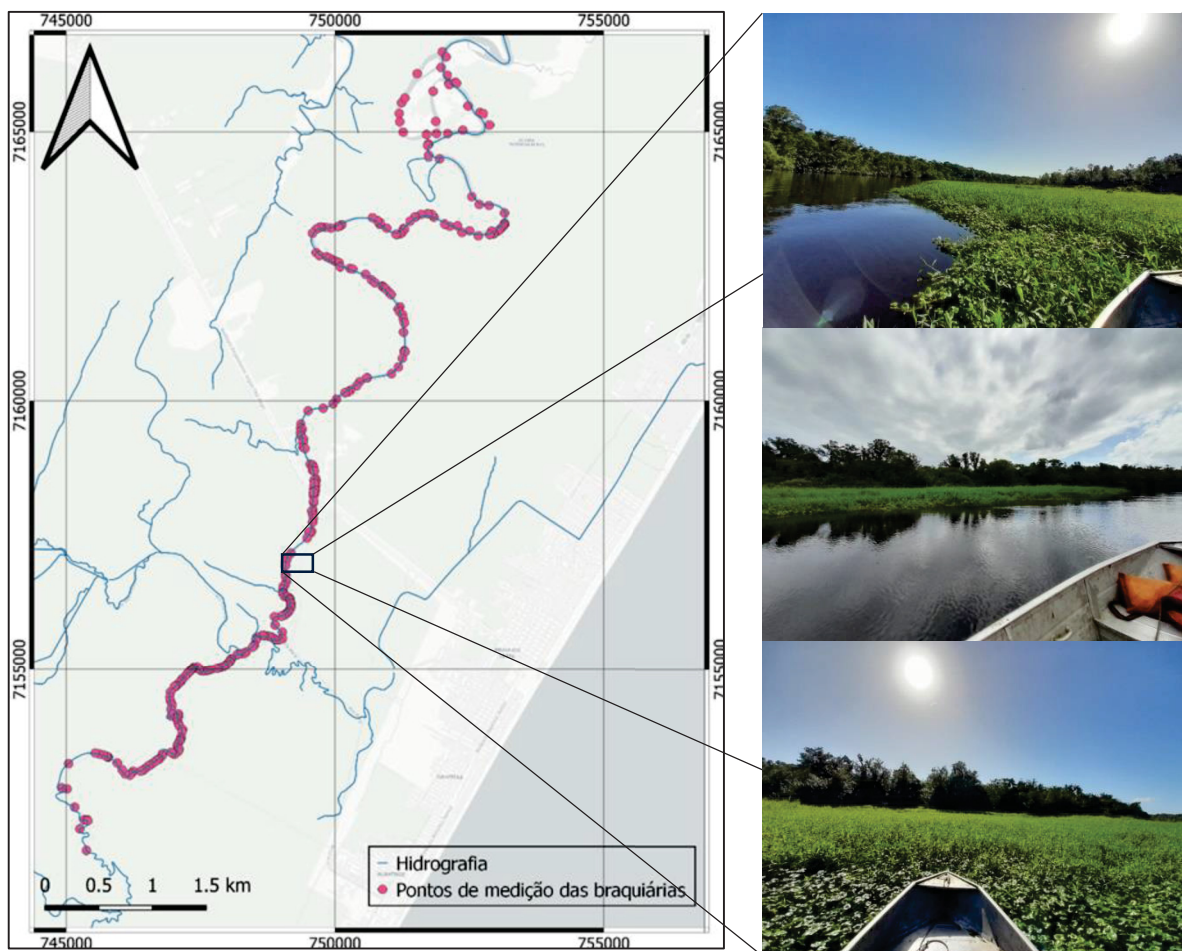


Figura 7 – Presença da espécie *Urochloa arracta* no rio Guaraguaçu e, em detalhe, fotos da região a 1,5 km da rodovia PR-407, sentido a embocadura. (Fonte: Autor)

3.2 ACOPLAMENTO DOS MODELOS

Neste trabalho, o acoplamento dos modelos é realizado a partir do esquema apresentado pela Figura 8. O acoplamento dos modelos hidrodinâmicos e o hidrológico permitiu representar detalhadamente o rio Guaraguaçu e seus afluentes, buscando compreender melhor a influência dos diferentes forçante no sistema.

Dessa maneira é utilizado o modelo hidrológico SWAT que fornece os valores de vazão diárias, usadas como condições de contorno no modelo de circulação hidrodinâmico. Os valores de elevação da superfície livre e concentração de sal na embocadura do rio Guaraguaçu são obtidos a partir do modelo hidrodinâmico e qualidade da água implementado na região do CEP. No acoplamento entre os modelos hidrodinâmico, as malhas utilizadas serão sobrepostas, até a confluência entre os rios Guraguaçu e Pery, permitindo assim que as variações no modelo hidrodinâmico do CEP possam ser coerentes com os valores utilizado para o modelo hidrodinâmico do Guaraguaçu.

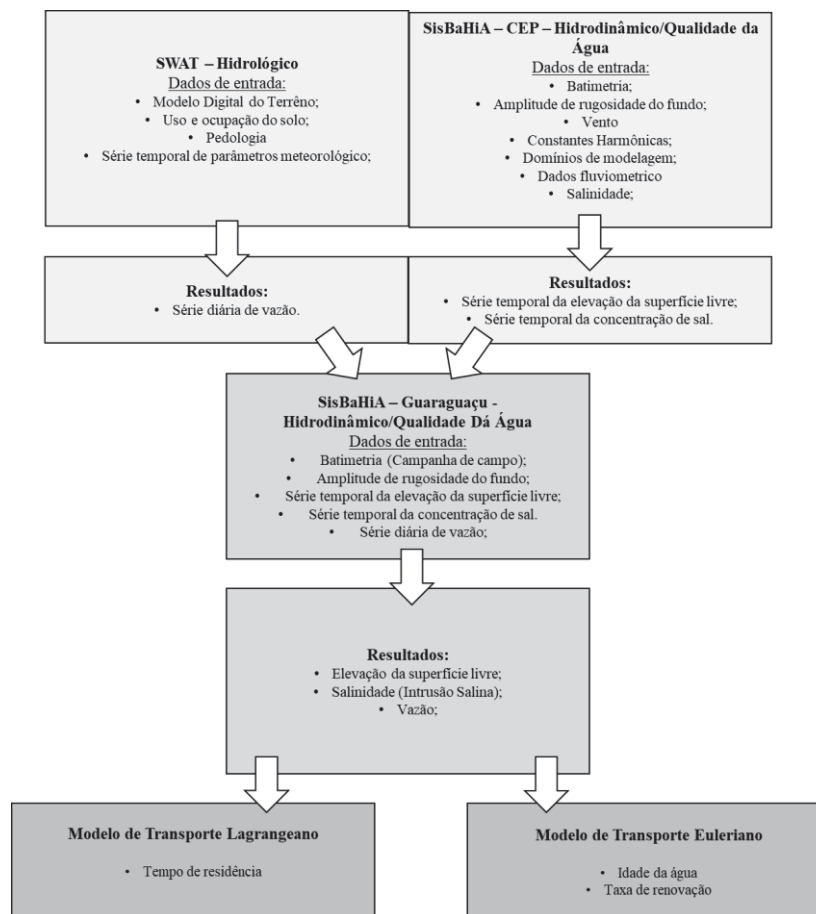


Figura 8 - Esquema das etapas de construção dos modelos (Fonte: Autor).

Os modelos hidrodinâmico e de qualidade da água do CEP usam a base desenvolvida por Polli et al (2021), calculando a elevação e as concentração de sal na embocadura do rio Guaraguaçu. Polli et al (2021) estudaram diferentes cenários hidrodinâmicos com mudanças climáticas no ano de 2050, considerando valores de descarga fluvial, velocidade e direção do vento e elevação da superfície livre em função das constantes harmônicas. Também foi simulado um cenário para calibração da elevação da superfície livre referente ao ano de 2001, com dados medidos pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), em três diferentes estações: Canal da Galheta, Porto de Paranaguá-Cais Oeste e Ponta do Felix.

No entanto, para que o acoplamento entre os modelos seja eficaz, é necessário verificar se as variações de vazões nos rios afluentes ao CEP influenciam a sua circulação. Dalazen et al. (2020) realizou a análise da renovação das águas no CEP e constatou que as variações das vazões, para períodos seco e chuvoso, não provocam significativas mudanças na elevação da superfície livre do CEP na região da baía de Paranaguá e nas proximidades da embocadura do rio Guaraguaçu. Portanto, é correto afirmar que os valores da elevação da superfície livre na fronteira do domínio, de certa maneira, são pouco dependentes das condições fluviométricas dos afluentes do CEP, possibilitando a utilização dos valores da elevação da superfície livre na região da embocadura do rio Guaraguaçu obtidos com vazões médias para os rios afluentes ao CEP.

Contudo, a concentração de sal depende fortemente das variações de vazão. No rio Guaraguaçu foi necessário a considerar a série temporal de vazão calculada via modelagem hidrológica, permitindo uma representatividade melhor em relação à intrusão salina que ocorre no sistema. Para os outros rios afluentes do CEP foram implementados os valores médios das vazões.

3.3 MODELAGEM HIDROLÓGICA

O SWAT, modelo hidrológico semi-distribuído utilizado nesse estudo, foi desenvolvido em 1996 e permanece em contínua atualização pela *Agricultural Research Service* (Serviço de Pesquisa na Agricultura) e pela Universidade Texas A&M. Esse modelo permite calcular os processos hidrológicos de uma bacia, considerando a precipitação, evaporação, infiltração, escoamento superficial e subterrâneo e fluxo de nutrientes, que podem auxiliar em modelagem de qualidade da água (Lima, 2016).

A utilização de um modelo semi-distribuído permite o cálculo de vazões em pontos distintos da bacia de drenagem, simplificando assim o processo de modelagem, e possibilitando

a criação de cenários onde há mudança no uso e ocupação do solo na região do entorno ao rio Guaraguaçu, que poderá ser utilizado em estudos futuros. Outra razão da utilização desse modelo é possibilidade de calcular parâmetros de qualidade da água e concentrações de sedimentos.

As Figura 9 à 11 e a Tabela 1 apresentam um esquema representativo das características dos rios pertencentes às sub bacias do rio Guaraguaçu. A presença da Serra do Mar na proximidade com a região costeira provoca elevadas declividades nos rios, como por exemplo o rio Brejatuba, que possui 11,0 Km de extensão e uma diferença entre cotas máximas e mínimas de 940 metros (8,54% de declividade).

Os rios com as maiores extensões são os rios Guaraguaçu, com aproximadamente 43,0 km de extensão, seguido pelos rios Cambará e Pery, tendo 22,0 km e 17,5 km respectivamente.

A configuração da hidrografia mostra que os rios Cambara e Guaraguaçu são os rios com a maior quantidade de afluentes. O rio Cambará é afluente ao rio Guaraguaçu e, na sua região de confluência está presente o rio Pery, importante rio da região, que apresenta os piores índices de qualidade da água, segundo Elset et al. (2019). O rio Pery é o principal receptor da drenagem urbana do município de Pontal do Paraná. No verão, quando a população do município aumenta significativamente, o excesso de carga favorece o desequilíbrio ambiental na região. E ainda, a presença de um aterro sanitário nas regiões próximas ao rio Pery gera um passivo ambiental severo para a qualidade do rio.

Tabela 1 – Caracterização dos valores fisiográficos dos principais rios pertencentes a bacia do rio Guaraguaçu.

Hidrografia	Área de drenagem (km²)	Cota máxima (m)	Cota mínima (m)	Extensão (km)
Rio Brejatuba	11,87	951,00	9,00	10,74
Rio Corisco	2,13	573,00	14,00	3,79
Rio das Pombas	6,39	805,00	7,00	7,02
Rio Pequeno	26,92	21,00	0,00	12,67
Rio Guaraguaçu	84,23	24,00	0,00	42,88
Rio Pery	44,01	16,00	2,00	17,58
Rio Cambará	46,15	124,00	2,00	21,85
Rio do Meio	10,50	759,00	4,00	10,84
Rio Cachoerinha	6,67	713,00	10,00	6,00
Rio Indaial	11,62	291,00	4,00	7,22

Fonte: (Autor, 2023).

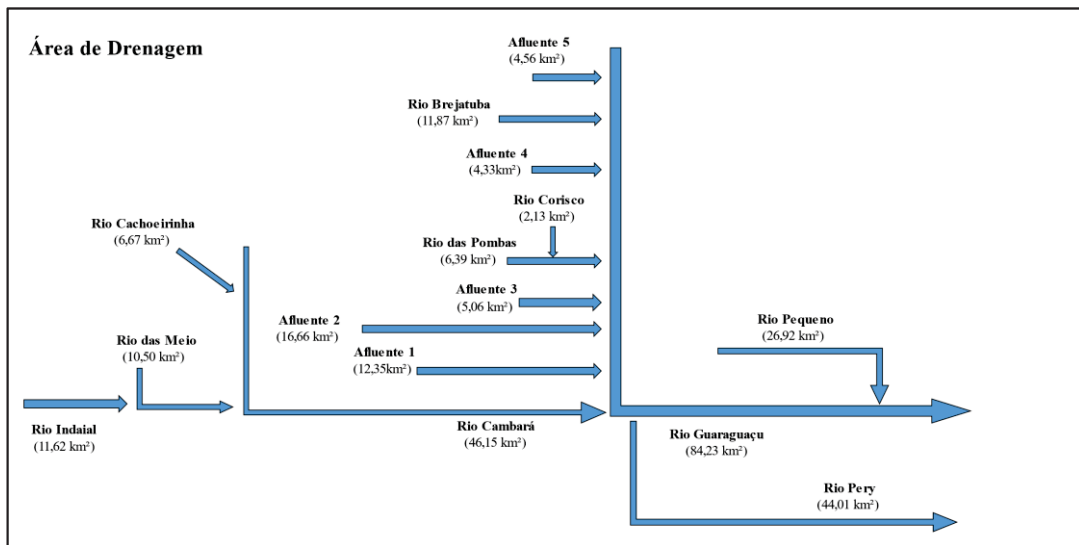


Figura 9 – Esquema representativo da bacia do rio Guaraguaçu com os valores da área de drenagem dos rios (Fonte: Autor).

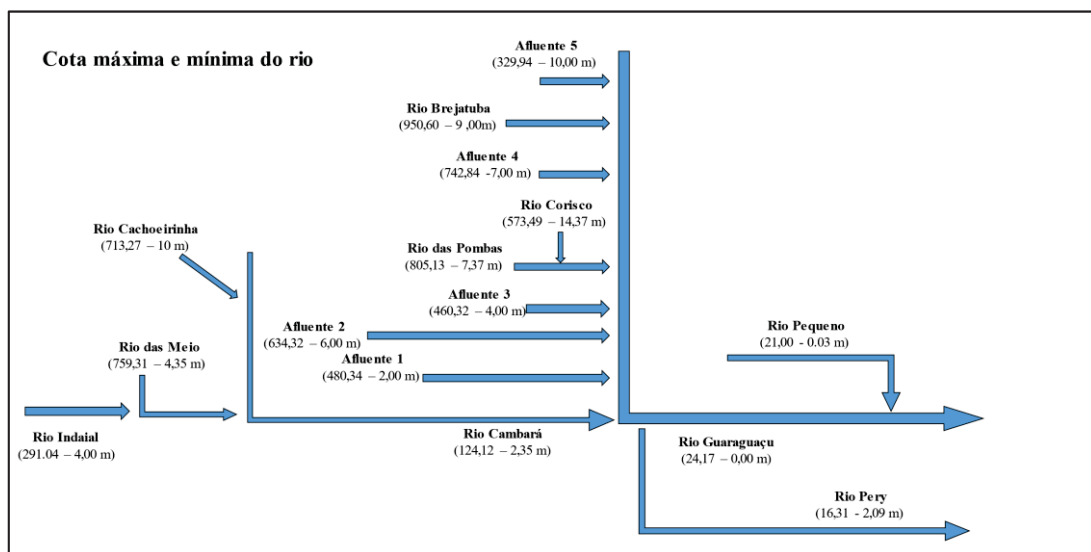


Figura 10 – Esquema representativo da bacia do rio Guaraguaçu com os valores das cotas máximas e mínimas dos rios (Fonte: Autor).

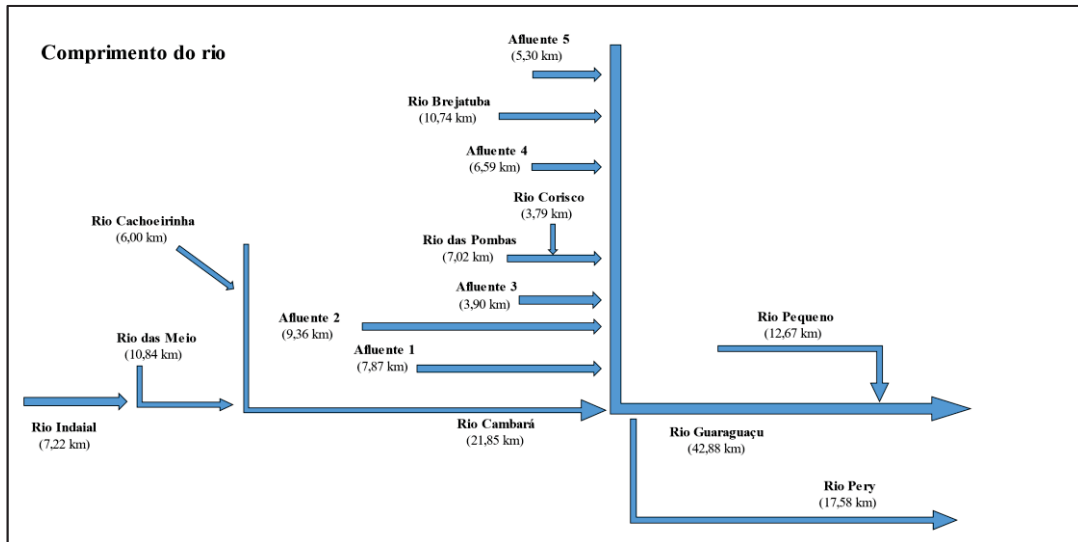


Figura 11 – Esquema representativo da bacia do rio Guaraguaçu com os valores das extensões dos rios (Fonte: Autor).

O Modelo Digital de Elevação (MDE) foi extraído da base de dados ALOS PALSAR, obtido pelo sensor PALSAR, que faz parte do satélite *Advanced Land Observing Satellite* (ALOS-1) em uma missão conduzida pela *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA) e *Japan Resources Observation System Organization* (JAROS) (ALVES, 2015). Essa missão tinha como objetivo realizar imageamento em alta resolução na escala continental, garantindo consistência espacial e temporal (JAXA, 2013 apud ALVES, 2015). O sensor PALSAR utiliza a técnica InSAR e possui resolução espacial variando entre 10 m e 100 m, com um ângulo de incidência médio de 34,3°. O MDE ALOS PALSAR é uma reamostragem do MDE SRTM para 12,5 m; o sensor PALSAR é usado para realizar correções no terreno (ASF ALASKA, 2015).

O MDE utilizado nesse estudo foi recortado pela área da bacia hidrográfica e convertido para o sistema de coordenadas SIRGAS 2000/UTM zona 22S (Figura 12). Nota-se a presença da Serra do Mar na bacia do rio Guaraguaçu, com os valores de elevação variando rapidamente, com as maiores altitudes em torno de mil metros.

A representação dos valores de elevação se deu pelo método quartil, opção disponível no Qgis; essa opção permite uma melhor visualização dos resultados, quando ocorrem as grandes variações de altitude.

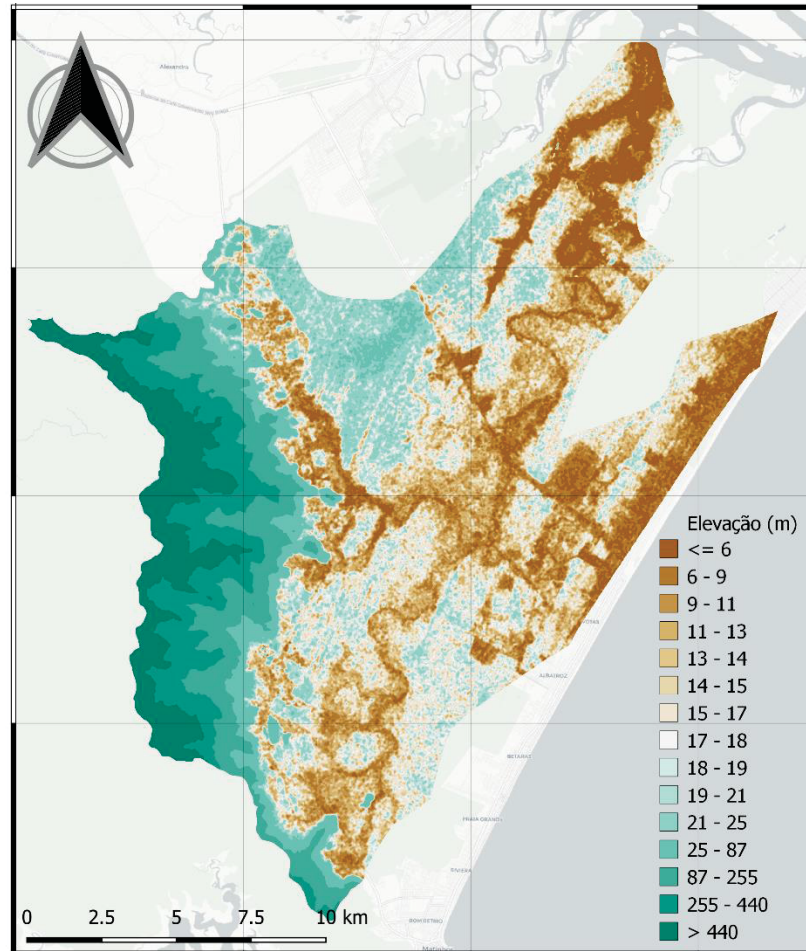


Figura 12 – Modelo digital do terreno da bacia hidrográfica do rio Guaraguaçu (Fonte: IAT, 2023)

Os dados referentes ao uso e ocupação do solo influenciam diretamente o comportamento do escoamento superficial e o regime fluviométrico de um rio. Para a bacia em questão, os dados de uso e ocupação do solo foram obtidos da plataforma de compartilhamento de dados do IAT (PR).

A classificação dos dados levou em consideração a tabela de atributos contida no arquivo vetorial disponível. Optou-se por utilizar o Nível II desta tabela, mesmo nível que consta no Relatório Técnico de Mapeamento – Base Integrada (2019) do Paraná. Este nível é definido como uma escala regional que pode abranger 12 categorias distintas para a classificação de uma determinada região. É importante ressaltar que, neste nível, nem todas as categorias podem ser interpretadas com a mesma confiabilidade apenas com base em dados de sensores remotos. Para uma interpretação precisa, são necessários dados complementares e observações de campo.

A utilização desse nível foi escolhida pela facilidade de relacionar os tipos de uso e ocupação do solo com os códigos disponíveis pelo SWAT. A Figura 13 apresenta o mapa do

uso e ocupação do solo para a região. É possível observar que a ocupação urbana fora dos núcleos dos municípios ocorre no entorno das estradas que fazem ligação com a capital do Estado.

A porcentagem do uso e ocupação do solo na Bacia Hidrográfica do rio Guaraguaçu, apresentados na Tabela 2, mostram a predominância de Floresta Nativa, com mais de 80% do território da bacia hidrográfica do rio Guaraguaçu, seguida por Pastagem/Campo com 4%. As áreas Urbanizadas representam somente 3,3% da área da bacia, pertencentes aos municípios de Pontal do Paraná e Matinhos. Fora dos núcleos dos municípios, as áreas urbanizadas são dispostas ao longo da estrada que liga as cidades litorâneas à capital do Estado, o município de Curitiba.

Tabela 2 – Porcentagem do uso e ocupação do solo na Bacia Hidrográfica do rio Guaraguaçu.

NIVEL II	AREA (km ²)	%
Várzea	0,54	0,17
Linha de Praia	0,01	0,00
Plantios Florestais	0,81	0,26
Restinga	16,59	5,34
Agricultura Perene	0,33	0,11
Agricultura Anual	2,11	0,68
Mangue	8,09	2,60
Corpos d'Água	7,78	2,50
Floresta Nativa	251,00	80,75
Solo Exposto/Mineração	0,71	0,23
Área Urbanizada	10,23	3,29
Área Construída	0,19	0,06
Pastagem/Campo	12,44	4,00
Total	310,82	100,00

(Fonte: IAT, 2019)

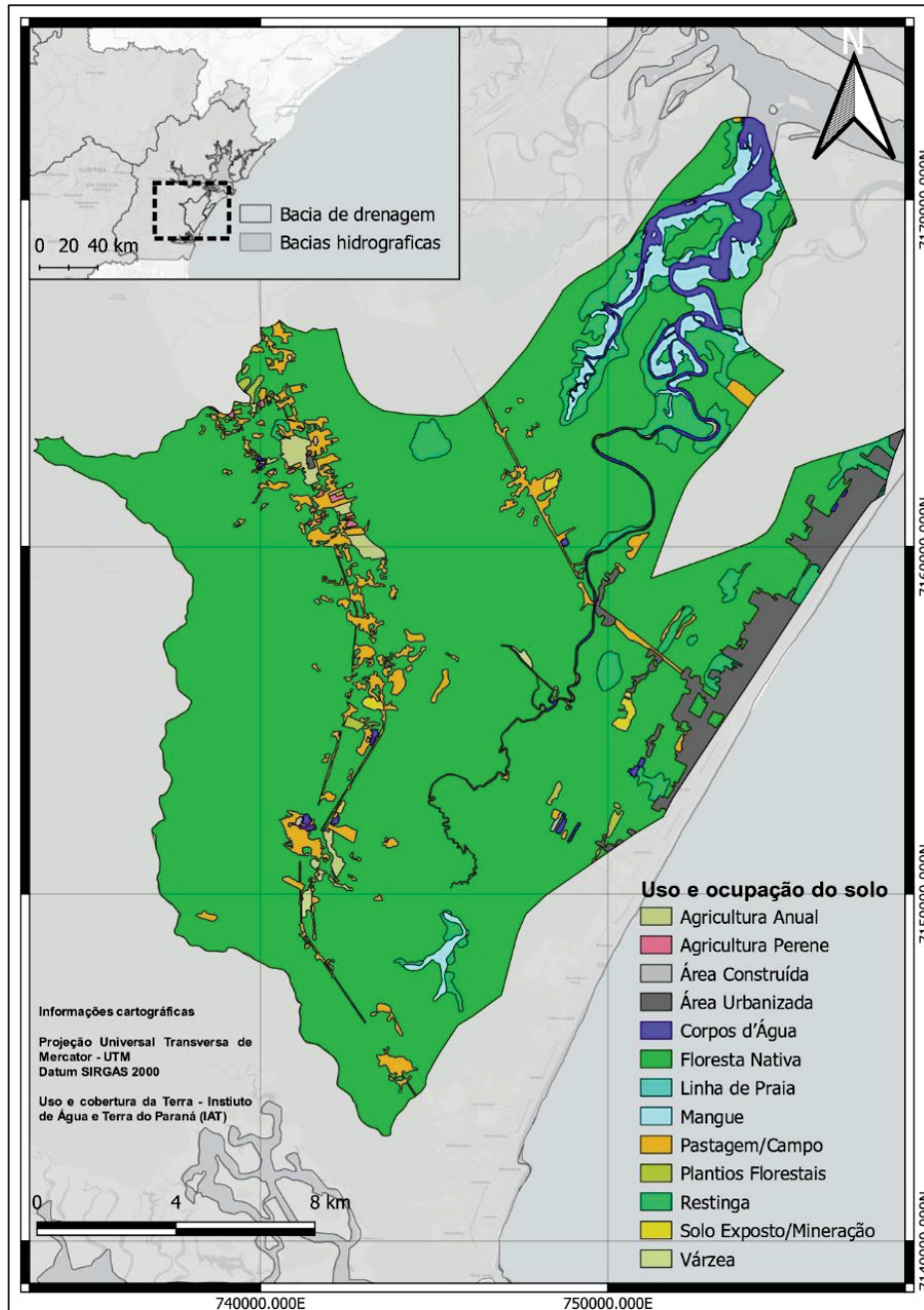


Figura 13 - Uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do rio Guaraguaçu. (Fonte: IAT, 2020)

Os dados da pedologia da bacia hidrográfica do rio Guaraguaçu foram retirados da plataforma de compartilhamento de dados do IAT, com os arquivos vetorizados obtidos junto ao Instituto de Terras, Cartografia e Geociências (ITCG). Segundo Coprape (2019), esses dados são importantes para caracterizar a aptidão agrícola e definir locais com ocorrências de erosão.

O solo predominante na região é o Espodossolo, caracterizado pelo acúmulo de matéria orgânica, comum na baixada litorânea ao longo da costa brasileira. Em seguida vem o

Cambissolo, presente em relevos altamente ondulados ou montanhosos, característicos da Serra do Mar Paranaense. A Tabela 3 e a Figura 14 apresentam a distribuição dos solos na bacia hidrográfica do rio Guaraguaçu.

Tabela 3 – Tipos de solo na Bacia Hidrográfica do rio Guaraguaçu.

Tipo de solo	AREA (km²)	%
Afloramento de rocha	29,55	9,51
Argissolo	5,36	1,72
Cambissolo	74,62	24,01
Espodossolo	178,63	57,47
Gleissolo	14,88	4,79
Corpos d'água	7,78	2,50
Total	310,82	100,00

(Fonte: Autor).

Para implementar dados de solo no SWAT são necessárias várias informações sobre as características do solo na região de interesse. O modelo utiliza um sistema de classificação de solos desenvolvido nos Estados Unidos, que é baseado nas propriedades físicas e químicas do solo. Dessa maneira, é necessário implementar informações sobre a textura, profundidade do perfil, capacidade de retenção de água, condutividade hidráulica, teor de matéria orgânica, pH, entre outras características relevantes. Essas informações podem ser obtidas através de análises laboratoriais ou levantamentos de campo. Neste trabalho, a classificação do solo se deu a partir da tabela de conversão que Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) disponibiliza em sua plataforma para os dados da *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO), referente à Unesco (1971).

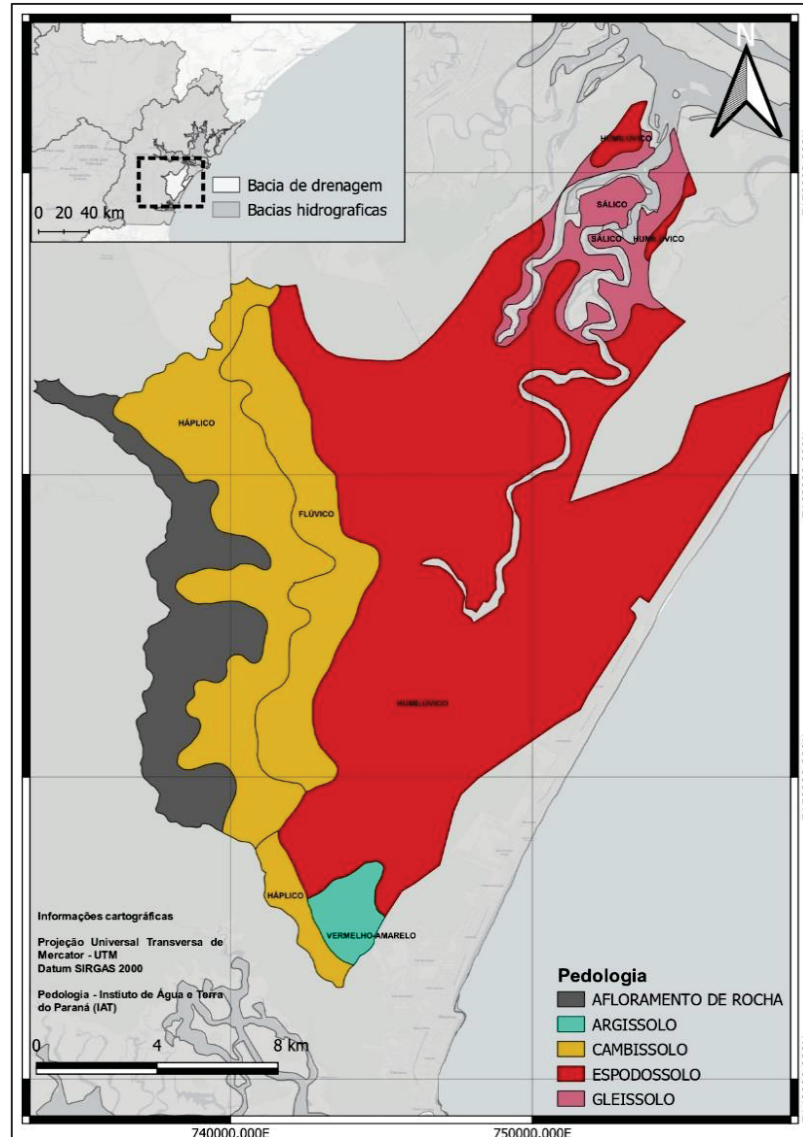


Figura 14 – Tipo do solo da região da bacia hidrográfica do rio Guaraguaçu. (Fonte: IAT, 2023)

Os dados meteorológicos necessários na realização da modelagem hidrológica foram extraídos de duas plataformas. A primeira foi da NASA (2023), onde as séries temporais de radiação solar, velocidade do vento, umidade relativa, temperatura máximas e mínimas foram extraídas. Essa base de dados, com nomenclatura POWER, é resultado da integração de observações via satélite e do modelo de reanálise MERRA-2. Essa plataforma oferece acesso detalhado aos parâmetros meteorológicos, em escala global. Cabe ressaltar que a base POWER disponibiliza diferentes resoluções espaciais de acordo com cada tipo de dado: 1.0° de latitude por 1.0° de longitude nos dados de radiação e ½° de latitude por 5/8° de longitude para valores de velocidade do vento, umidade relativa, temperatura máximas e mínimas. Essa característica é particularmente útil quando se trata nas análises climáticas detalhadas, modelagem de processos naturais e estudos que requerem alta resolução espacial. A Figura 15 mostra a

localização do ponto onde foram extraídos os dados, e apresenta a localização da estação pluviométrica, retirada a partir do sistema *Hidroweb*, utilizada no estudo. As Figura 16 a 19 apresentam os dados meteorológicos para o período de 01/01/1990 a 31/12/2022 da base de dados da NASA (2023).

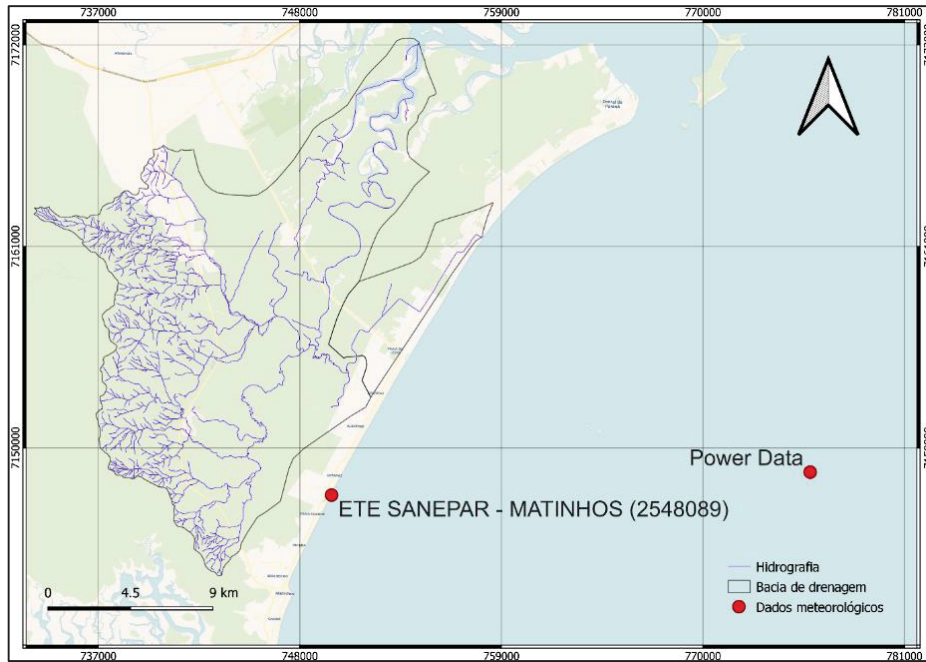


Figura 15 – Localização dos dados meteorológicos usadas na modelagem hidrológica (Fonte: Autor).

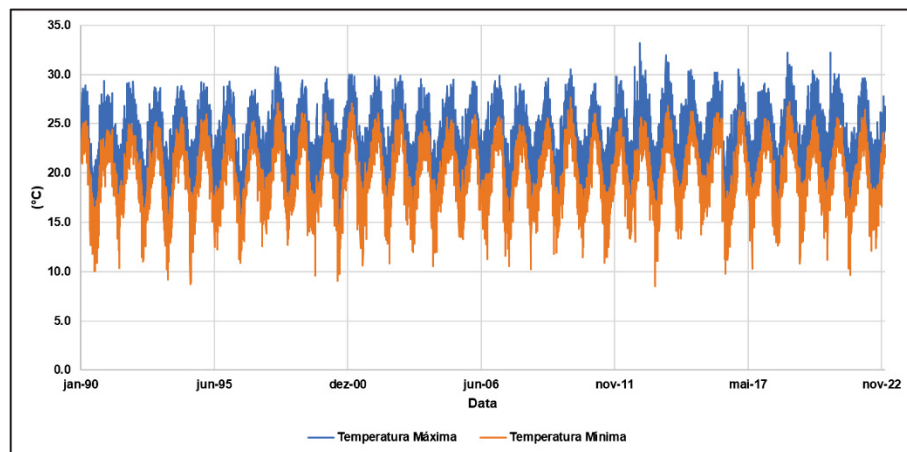


Figura 16 – Série diária de temperatura máximas e mínimas extraída da base de dados PowerData. (Fonte: NASA, 2023)

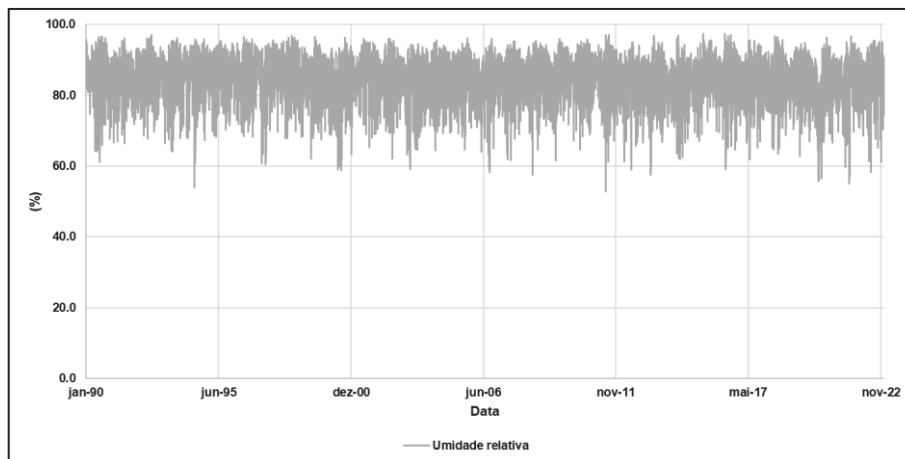


Figura 17 – Série diária de Umidade relativa extraída da base de dados PowerData. (Fonte: NASA, 2023)

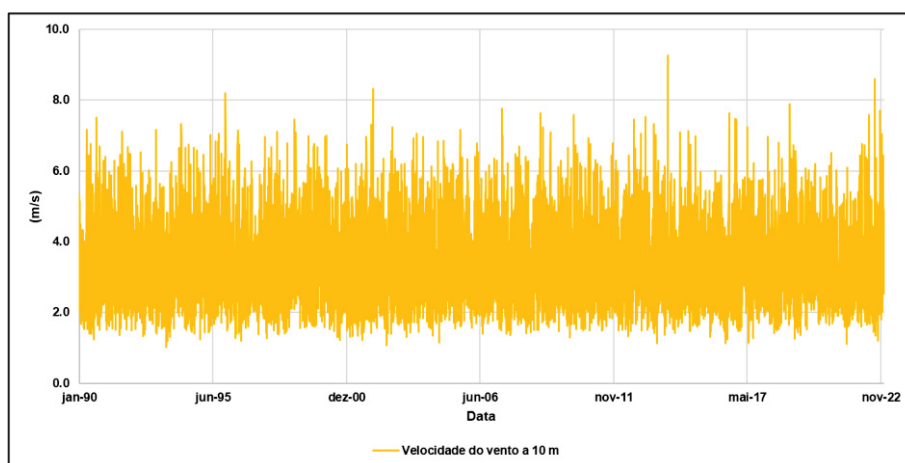


Figura 18 – Velocidade do vento à 10,0 m extraída da base de dados PowerData. (Fonte: NASA, 2023)

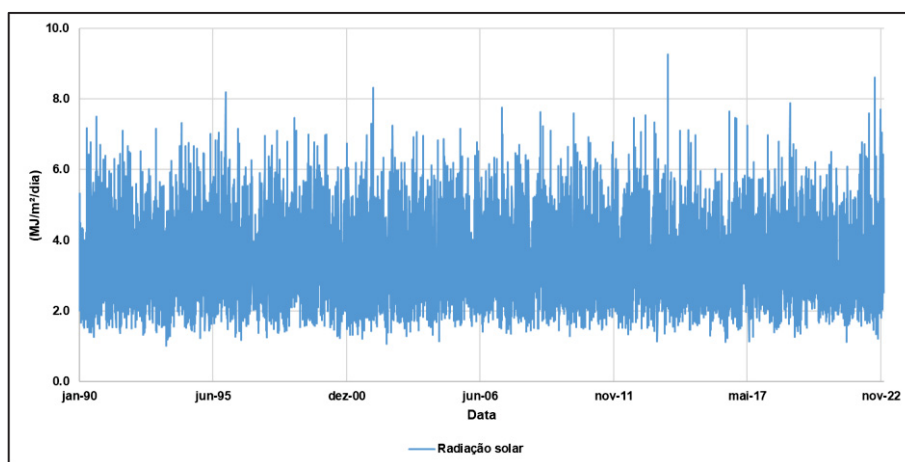


Figura 19 – Radiação Solar extraída da base de dados PowerData. (Fonte: NASA, 2023)

Os dados pluviométricos usados neste trabalho foram obtidos na estação ETE Sanepar – Matinhos (Figura 15), com código 2548089 no sistema da *Hidroweb* (SNIRH, 2023), operada pelo IAT, no período de 01/01/2008 a 31/12/2022.

Após a análise do ano hidrológico na região, considerou-se como início o mês de agosto, com o final em julho, com janeiro a março os meses com maiores índices pluviométricos. As Figura 20 e Figura 21 apresentam os acumulados diários de precipitação no período e as médias mensais para o ano hidrológico, respectivamente.

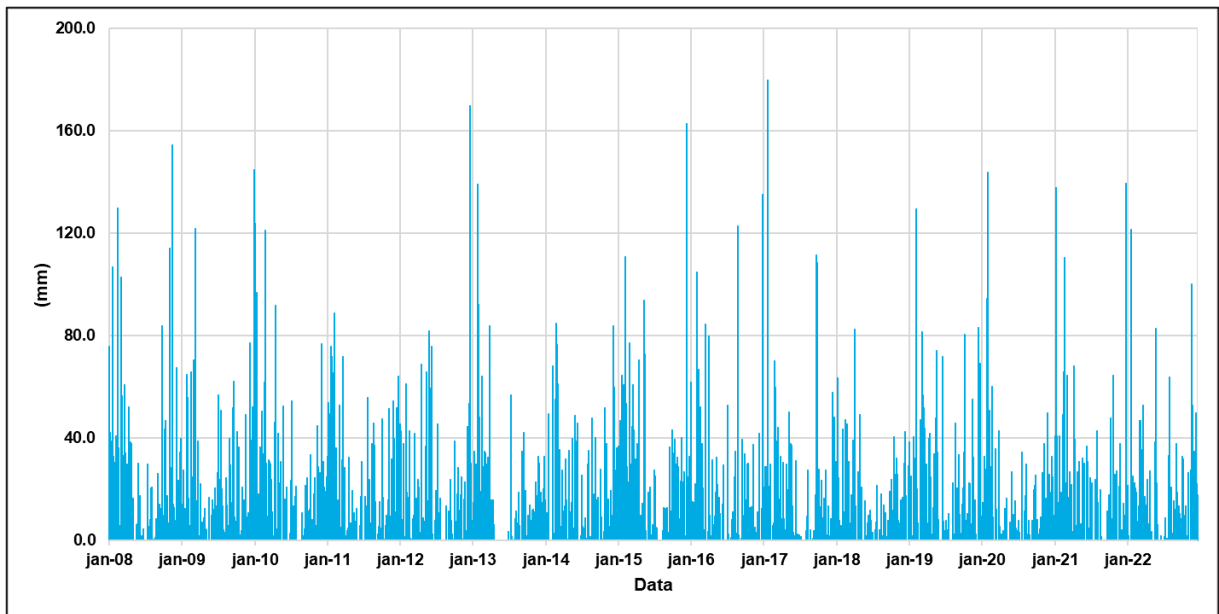


Figura 20 – Acumulados diários de precipitação na estação ETE SANEPAR – Matinhos (Fonte: Adaptado SNIRH, 2023).

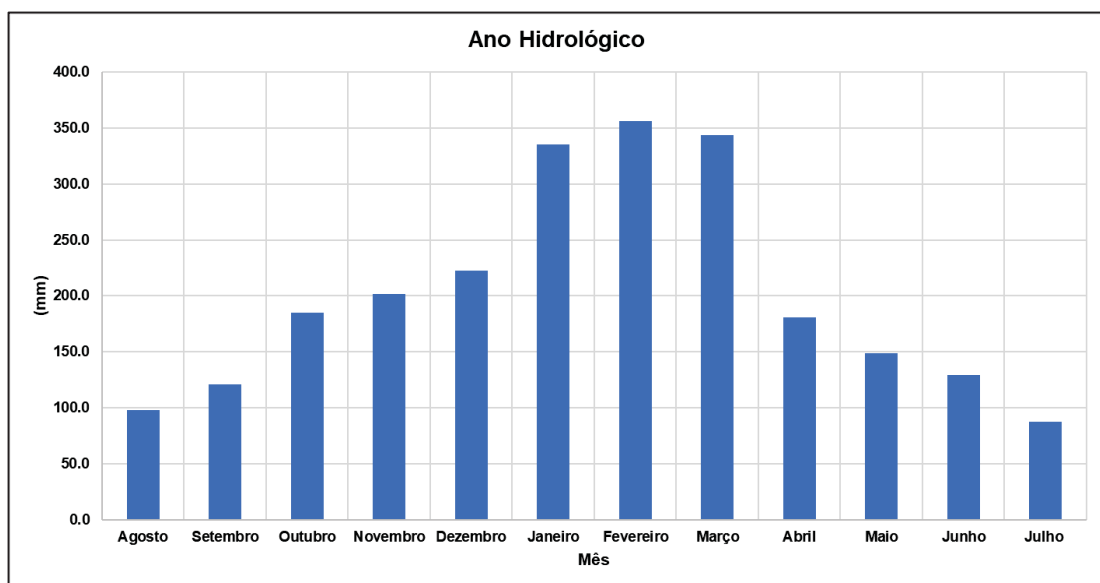


Figura 21 – Médias mensais de precipitação para um ano hidrológico na estação ETE SANEPAR – Matinhos (Fonte: Autor).

Na análise da série histórica de precipitação usando os dados disponíveis da estação ETE SANEPAR – Matinhos, foram calculados os valores das chuvas mensais acumuladas para o período da série, entre janeiro de 2008 e dezembro de 2022. A Tabela 4 apresenta os valores da estação ETE SANEPAR – Matinhos, organizado do maior para o menor valor da chuva acumulada mensal. Nota-se que os maiores valores ocorreram nos meses de novembro de 2008 e fevereiro de 2020 com 645,0 e 637,0 mm, respectivamente. Os menores valores aconteceram nos meses de julho de 2017 e 2022 com valores de 10,0 e 13,0 mm, respectivamente.

Tabela 4 - Chuva mensal acumulada para a estação ETE SANEPAR – Matinhos em ordem decrescente.

Mês/Ano	mm	Mês/Ano	mm	Mês/Ano	mm	Mês/Ano	mm	Mês/Ano	mm	Mês/Ano	mm
nov/08	645	mar/22	304	mar/16	219	dez/17	170	abr/14	136	jul/16	79
fev/20	637	nov/15	302	out/22	214	nov/21	168	nov/13	135	ago/14	78
jan/10	625	out/08	301	nov/19	212	nov/14	167	nov/12	132	set/10	78
jan/22	563	dez/20	296	jun/22	211	nov/09	166	abr/22	132	mai/11	74
fev/15	540	abr/12	295	fev/10	209	jul/12	166	jun/16	131	jun/15	71
mar/10	529	jun/12	291	fev/12	207	mai/18	163	out/11	129	abr/20	70
fev/11	502	abr/15	290	ago/22	202	dez/13	163	dez/21	127	set/11	70
dez/15	484	out/17	289	fev/18	202	mar/20	158	ago/16	124	out/14	67
mar/15	466	fev/17	287	jun/10	200	mai/12	157	ago/20	122	ago/10	62
mar/21	464	abr/10	286	abr/18	196	jan/19	157	abr/09	117	ago/17	62
jan/11	459	mai/17	285	set/14	195	mai/16	153	nov/18	115	jun/11	62
fev/13	452	mar/11	281	nov/11	195	jul/10	152	out/10	115	ago/18	60
mar/08	432	dez/11	277	dez/09	194	jul/11	152	mar/12	113	mai/09	59
fev/16	431	jul/09	273	jan/20	193	jun/21	151	jun/09	111	jul/20	58
mar/14	424	jan/12	270	out/16	192	dez/18	150	set/08	110	jun/18	56
fev/08	414	out/18	263	out/19	191	fev/22	148	set/13	109	ago/13	53
fev/21	410	ago/11	261	set/22	191	out/12	146	out/13	108	jul/21	53
mar/19	389	nov/22	259	abr/21	191	jun/19	144	nov/16	106	set/12	53
mar/09	388	out/15	255	mai/21	188	set/19	143	dez/19	105	set/20	48
mar/17	385	dez/14	252	abr/19	188	abr/17	141	nov/17	103	set/18	45
jan/21	377	dez/10	251	jun/14	183	set/17	140	abr/11	101	ago/12	41
fev/09	376	mai/19	251	mai/10	182	abr/16	138	mai/08	98	mai/20	35
dez/12	373	abr/08	250	set/16	182	mai/14	138	out/20	98	jul/19	35
jan/17	372	jan/16	246	nov/10	180	set/15	138	jun/17	95	jul/08	31
jan/15	369	jan/13	245	fev/14	179	mai/22	137	jun/08	94	jul/18	26
mar/13	360	mar/18	242	abr/13	178	ago/21	137	dez/16	90	ago/19	25
fev/19	351	dez/22	235	dez/08	176	ago/08	137	jul/15	87	ago/15	22
mai/15	313	jan/18	226	jan/14	175	nov/20	137	ago/09	85	jul/22	13
set/09	309	jan/09	219	out/09	170	jun/20	136	jul/14	82	jul/17	10

(Fonte: Autor).

A base de dados da NASA (2023) possui séries com dados pluviométricos, contudo não foram utilizados nesse estudo, por duas razões: a primeira em função da localização da estação, que se encontra muito distante da região de interesse do estudo e, a segunda foi a divergência com os dados da estação ETE – SANEPAR – Matinho, subestimando na maior parte do tempo os valores de precipitação. A Figura 22 apresenta uma comparação entre os valores de precipitação entre as duas bases de dados, no ano de 2009. No dia 20/03/2009, a precipitação medida na estação ETE-SANEPAR – Matinhos foi 121,0 mm enquanto os dados obtidos na plataforma POWER foi 8,6 mm.

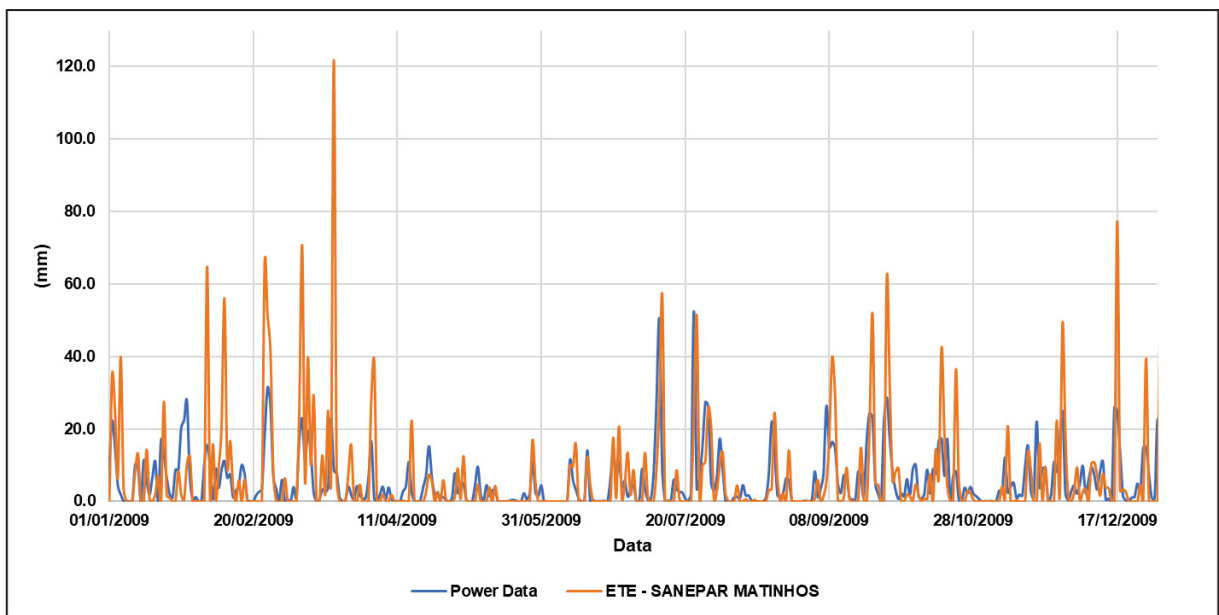


Figura 22 – Comparação entre os valores de precipitação entre as duas bases de dados utilizadas.(Fonte: Autor)

A partir dos valores obtidos pela base de dados da NASA (2023) e na estação ETE – SANEPAR – Matinho foi criado um banco de dados de parâmetros climáticos, com valores mensais (Tabela 5), necessário para as simulações realizadas pelo SWAT. Esses valores são utilizados no preenchimento de falhas dos dados meteorológicos (Sharpley e Williams,1990). Para o preenchimento de falhas dos dados de precipitação diária, é usada uma cadeia-assimétrica de Markov (Nicks, 1974) ou modelo Markov de cadeia exponencial (Williams, 1995).

Tabela 5 - Parâmetros climáticos calculados a partir dos dados da estação climática.

Parâmetros	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Max tmp (°C)	26,99	27,08	26,23	24,65	22,36	20,46	19,85	20,15	21,30	22,60	23,86	25,72
Min tmp (°C)	23,91	24,07	23,35	21,71	19,15	17,08	16,21	16,47	17,70	19,22	20,54	22,30
Max tmp std (°C)	1,72	1,54	1,43	1,66	1,73	2,09	1,98	2,12	2,12	2,03	1,79	1,91
Min tmp std (°C)	1,31	1,20	1,14	1,55	1,63	1,92	1,80	1,64	1,43	1,30	1,43	1,46
Pcp avg (mm)	321,07	356,23	343,61	180,64	159,42	138,16	87,78	98,06	129,27	185,22	201,38	222,69
Pcp std (mm)	20,99	24,12	20,02	13,41	11,57	11,55	8,30	8,26	11,66	11,96	15,38	17,85
Pcp skew (mm)	3,66	3,15	2,62	3,41	3,59	3,86	4,15	3,73	5,74	3,78	4,85	5,07
Prob. Dry (%)	43,00	36,00	44,00	35,00	29,00	23,00	18,00	18,00	32,00	39,00	34,00	37,00
Prob. Wet (%)	67,00	72,00	71,00	61,00	57,00	57,00	52,00	56,00	61,00	66,00	69,00	59,00
Pcp days (%)	17,71	16,13	18,73	14,26	12,71	10,71	8,73	9,33	13,78	16,73	15,93	14,80
Max rainfall (mm)	26,66	31,38	25,84	18,75	14,53	13,52	10,46	10,00	15,49	16,08	17,68	24,28
Slr (MJ/m ² /dia)	18,31	18,26	15,53	13,90	11,00	9,45	10,47	11,94	13,04	14,25	17,24	18,43
Ur (%)	0,84	0,83	0,83	0,82	0,82	0,84	0,85	0,86	0,85	0,85	0,83	0,84
Wnd (m/s)	8,26	7,69	6,75	5,58	4,51	3,97	4,22	5,06	6,07	7,25	8,21	8,44

(Fonte: Autor).

Nota: Max Tmp: Máxima temperatura (°C); Min Tmp: Mínima temperatura (°C); Max tmp std: Desvio da Temperatura Máxima (°C); Min tmp std: Desvio da Temperatura Mínima (°C); Pcp avg: Precipitação média (mm); Pcp std: Desvio da Precipitação (mm); Pcp skew: O coeficiente de assimetria da média da precipitação (mm); Prob. Dry: Probabilidade de dias de chuva seguidos de dias de seca (%); Prob wet: Probabilidade de dias de chuvas seguidos de dias de chuva (%); Pcp days: Número médio de dias de precipitação em um mês; Max rainfall: Precipitação máxima de 0,5 horas (mm); Slr: Radiação solar média diária no mês (MJ/m²/dia); Ur: umidade relativa; Wind: Velocidade do vento (m/s).

Os dados de vazão são determinantes na calibração do modelo hidrológico. A única estação presente dentro da bacia do rio Guaraguaçu que possui dados é a estação ETA – MATINHOS (Código ANA: 8222000), pertencente ao IAT. O período disponível é de 2003 a 2009. A Tabela 6 e a Figura 23 apresentam os dados da estação e a série de vazões medidas. Na série em questão é perceptível a relação dos maiores picos de vazão nos meses de maior pluviosidade, como por exemplo o valor de 10,36 m³/s no dia 22/11/2008, e 0,22 m³/s para o dia 02/04/2005, que corresponde ao menor valor medido nessa série histórica.

Tabela 6 – Dados da estação ETA- Matinhos (Colônia) localizado na bacia hidrográfica do rio Guaraguaçu.

Dados da estação	
Estação:	ETA - MATINHOS (COLONIA)
Município:	Paranaguá
Tipo:	FQDS ²
Altitude:	10.000 m
Rio:	Rio Cambará
Código:	82220000
Instalação:	24/03/1948
Bacia:	Litorânea
Latitude:	25° 43' 39"
Área drenagem	13,00 km ²
Entidade:	ANA
Extinção:	30/11/2009
Sub-bacia:	2
Longitude:	48° 35' 30"
Classe:	2

(Fonte: Adaptado SNIRH, 2023)

² Nota: F: Fluviometria; Q: Qualidade da água; D: Medição de descarga; S: Sedimento

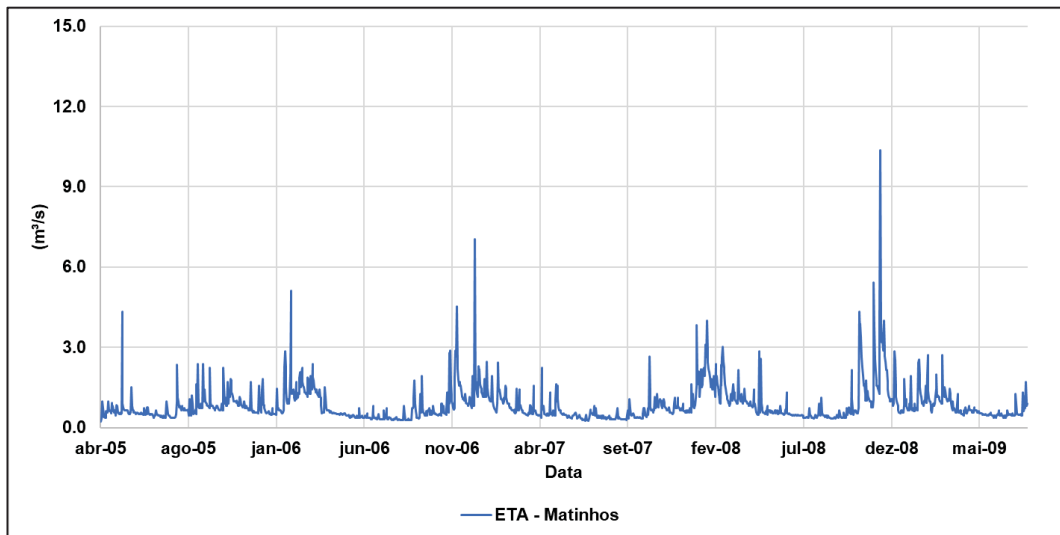


Figura 23 – Valores diários de vazão na estação ETA-Matinhos (8222000) (Fonte: Adaptado SNIRH, 2023).

Com relação às captações de água na bacia do rio Guaraguaçu, conforme o PMSB (2020) do município de Pontal do Paraná, há um único ponto de captação. Os valores de captação variam de acordo com as épocas do ano: nos períodos de baixa temporada (março a outubro), a vazão é de 1.260,0 m³/h, com duração de 8 horas de bombeamento. Durante a alta temporada (novembro a fevereiro), a vazão bombeada é de 2.768,0 m³/h, com duração de 24

horas. Conforme o PMSB, esses valores são suficientes para suprir as necessidades de abastecimento da população de Pontal do Paraná até o ano de 2043.

A definição das Unidade de Respostas Hidrológicas (HRUs) é necessária para a realização da modelagem hidrológica. As HRUs (*Hydrologic Response Unit – HRU*) são unidades espaciais básicas que representam áreas homogêneas dentro da bacia hidrográfica, definidas pela combinação das características físicas e hidrológica semelhantes, como o tipo do solo, uso da terra, topografia e capacidade de retenção da água.

O SWAT fornece duas opções de distribuições de HRU's, uma considerando como característica dominante o uso e ocupação do solo e a pedologia e a outra com o nível de sensibilidade de uso da terra e dados de solo inseridos. Para este estudo foram definidos as HRU's considerando as características de uso e ocupação do solo e pedologia predominante na área.

As subdivisões da bacia do rio Guaraguaçu foram definidas conforme a hidrografia disponibilizada e as configurações disponíveis no modelo. A Figura 24 apresenta as sub-bacias utilizadas na modelagem.

Vale ressaltar que, na calibração do SWAT, foi necessária a criação de uma sub-bacia de monitoramento no rio onde ocorreu o monitoramento de vazão, nomeada de sub-bacia 14; essa sub-bacia servirá de base para a calibração do modelo hidrológico.

O SWAT necessita de um programa complementar para a calibração do modelo hidrológico, o SWAT Toolbox. Esse programa é uma extensão do modelo SWAT, que permite a calibração manual ou automática e utiliza, de forma separada, as regiões de interesse no modelo, como por exemplo, um único rio ou uma HRU específica. Isso admite uma melhor acurácia na calibração e um melhor desempenho do modelo.

A calibração foi realizada com os dados de vazão da estação ETA – Matinhos, no período de agosto de 2008 a julho de 2009. Esse período foi definido pela disponibilidade dos dados de vazão e pluviométricos. Os índices estatísticos disponíveis no próprio SWAT + Toolbox, que definirão a calibração do modelo hidrológico são o Coeficiente de *Nash-Sutcliffe* (NSE), o Percentual de Tendência (PBias) e Erro Padrão Normalizado (RSR). A Tabela 7 apresenta a classificação dos critérios de calibração para o estudo atual.

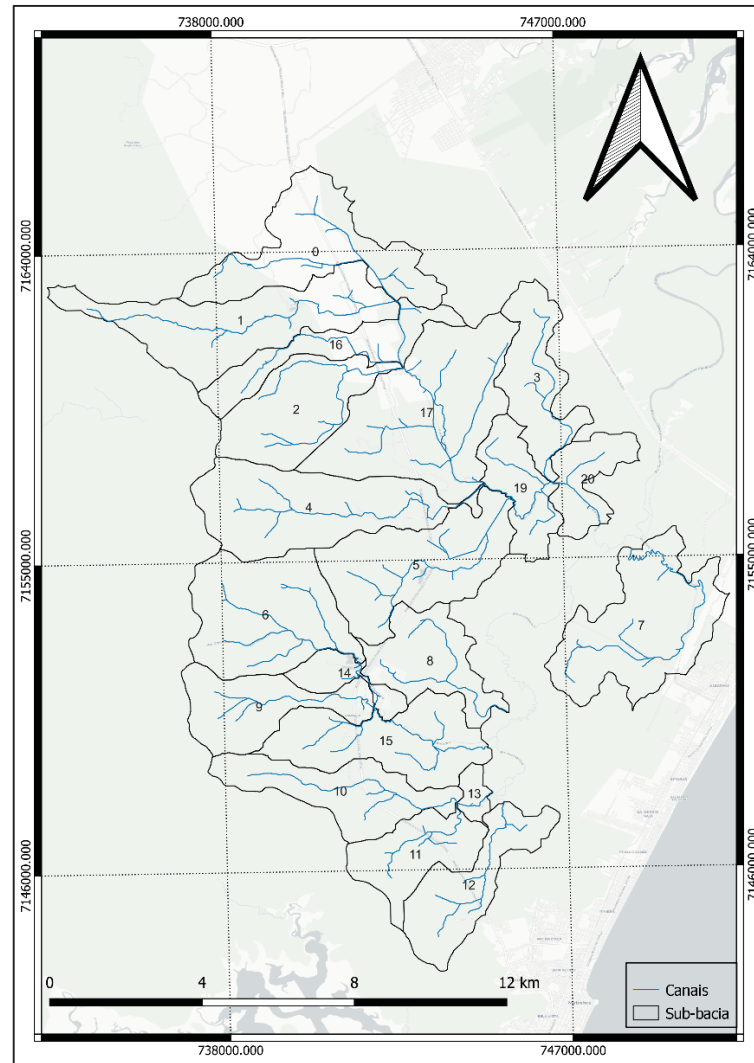


Figura 24 – Sub-bacias da bacia do rio Guaraguá, com os canais de drenagem (Fonte: Autor).

Tabela 7 - Classificação dos critérios de calibração

Classificação	RSR	NSE	PBIAS
Muito bom	$0.00 \leq RSR \leq 0.5$	$0.75 \leq NSE \leq 1.00$	$PBIAS \leq \pm 10$
Bom	$0.50 \leq RSR \leq 0.6$	$0.65 \leq NSE \leq 0.75$	$10 \pm \leq PBIAS \leq \pm 15$
Satisfatório	$0.60 \leq RSR \leq 0.70$	$0.50 \leq NSE \leq 0.65$	$15 \pm \leq PBIAS \leq \pm 25$
Não Satisfatório	$RSR \geq 0.7$	$NSE \leq 0.50$	$PBIAS \geq \pm 25$

Adaptado: Moriasi et al. (2007).

Primeiramente o processo de calibração foi feita de forma automática com parâmetros utilizados no estudo de Baldissara (2005), e posteriormente foram inseridos outros parâmetros devido à análise de sensibilidade do modelo, ferramenta necessária para uma melhor acurácia na calibração.

Os parâmetros de calibração são divididos em grupos, onde o grupo **HRU** são referentes às unidades de respostas hidrológicas, **SOL** são em função das características do solo e **RTE** são parâmetros relacionados as rotinas de cálculos do modelo.

Segundo a construção da modelagem e os dados disponíveis, o parâmetro que representa a maior influência na calibração é a Condutividade hidráulica efetiva em função da água subterrânea (CHK). No Apêndice são apresentados os valores dos parâmetros usados e mostrando graficamente a influência desse parâmetro (CHK) para a calibração.

3.4 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. O SisBaHiA[®] dispõem de vários modelos: 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, 2023).

Os modelos utilizados nesse estudo foram o modelo de circulação hidrodinâmico bidimensional acoplado com o modelo de qualidade da água e os modelos de transporte Lagrangeano e Euleriano. Na sequência são apresentadas resumidamente as características de cada modelo.

A fim de simular o transporte de substâncias, é necessário conhecer o padrão de circulação do corpo d'água, que é obtido a partir do modelo hidrodinâmico. O SisBaHiA[®] possui um modelo de circulação hidrodinâmica tridimensional (3D) ou bidimensional na horizontal (2DH). O modelo utilizado nesse trabalho é o modelo bidimensional integrado na vertical, onde as incógnitas são as componentes das velocidades Norte-Sul (V), Leste-Oeste (U) e elevação da superfície livre. A utilização do modelo 2DH se deu pela necessidade de simular os processos transversais e de renovação da água que acontecesse no sistema, sendo esse modelo melhor representativo para o objetivo do estudo.

As condições de contorno do modelo hidrodinâmico são os dados de elevação da superfície livre, ao longo do contorno aberto, geralmente relacionado com regiões costeiras adjacentes. Os valores de velocidade ou vazão são inseridos como condição de contorno nas

fronteiras de terra, podendo ser margens ou seções de rios. Quanto às condições iniciais são necessários dados das componentes da velocidade na direção x e y , U e V , e valores de elevação da superfície livre.

O SisBaHiA[®] resolve as equações diferenciais parciais de primeira ordem no tempo, e segunda ordem no espaço. O método de elementos finitos é utilizado para a discretização espacial horizontal, usando elementos quadrangulares biquadráticos e/ou triangulares quadráticos. O método dos elementos finitos pode ser bastante eficaz na discretização de domínios complexos, como a região de interesse nesse trabalho.

Segundo Rosman (2023), os inúmeros constituintes podem compor a massa específica da água, sendo essenciais na definição de sua qualidade. Tais constituintes podem ser classificados diante a sua interferência na hidrodinâmica e na reatividade com o meio. A reatividade pode ser descrita como ativa, quando os gradientes do constituinte geram forças em magnitude suficiente para interferir no movimento das águas, em geral forças de empuxo devido a gradientes de densidade, ou passiva, quando os gradientes não geram forças relevantes para interferir no movimento das águas (Rosman, 2023.). A reatividade pode ser neutra ou não-reativa, quando a substância não sofre reações cinéticas de produção ou consumo, ou reativa, quando a substância sofre reações cinéticas de consumo ou produção. O modelo de qualidade da água do SisBaHiA[®] calcula 11 constituintes: Salinidade (ups), Temperatura (°C), Oxigênio Dissolvido (mgO₂/L), Demanda Bioquímica de Oxigênio (mgO₂/L), Amônia (mgNA/L), Nitrato (mgNI/L), Nitrogênio Orgânico (mgNO/L), Fósforo Inorgânico (mgP/L), Fósforo Ogrânico (mgP/L), Clorofila_a (μChla/L) e Zooplâncton (mgZ/L).

Dentre esses constituintes, a salinidade e a temperatura podem ter comportamento ativo ou passivo, dependendo se efeitos baroclínicos estão presentes, quando os gradientes de densidade são considerados ou não na modelagem hidrodinâmica. Esses dois constituintes são tratados como escalares passivos quando se admite que sua variação não interfere de modo sensível na massa específica da água, não gerando gradientes de densidade suficientes para interferir na hidrodinâmica. Contudo, se forem considerados escalares ativos, a modelagem de seu transporte faz parte da modelagem hidrodinâmica e os modelos hidrodinâmicos e de transporte de salinidade e/ou calor devem ser calculados de forma acoplada.

Nesse trabalho utilizaremos o acoplamento do modelo de qualidade da água, considerando o transporte de sal, com o modelo hidrodinâmico. Os valores da série temporal para as concentrações de sal são inseridos como condição de contorno na embocadura do domínio do modelo hidrodinâmico do rio Guaraguaçu, assim como os valores de elevação da superfície livre calculados para os cenários considerados.

O modelo de transporte Lagrangeano do SisBaHiA[®] é usado nesse estudo para o cálculo do tempo de residência que, nesta abordagem, é uma função local que varia no espaço. Esse modelo usa os campos de velocidade calculados no modelo hidrodinâmico e as demais características geométricas, além de parâmetros relacionados à circulação, como a velocidade de atrito e a viscosidade cinemática.

Segundo Rosman (2023), esse modelo calcula o movimento das partículas lançadas em regiões do domínio em intervalos regulares, sofrendo a advecção pelas correntes computadas pelo modelo hidrodinâmico. A posição de cada partícula é determinada através da expansão em série de Taylor a partir da posição anterior, conhecida.

Após a determinação da nova posição da partícula, é realizado um desvio aleatório, causado pelos movimentos em escalas não resolvíveis que, em geral, funcionam, como Rosman (2023) define, como “velocidades difusivas”, no qual a magnitude desse desvio é função das derivadas espaciais das difusividades turbulentas.

Com isso, existem duas abordagens que podem ser feitas dentro do modelo. Uma abordagem seria analisar a renovação da água, computando diretamente as Taxas de Renovação de Água em diferentes pontos, ao longo do tempo e a outra, uma abordagem para os resultados de permanência da água em diferentes setores, enumerando diferentes pontos ao longo do tempo no domínio estudado.

Para as condições de contorno do modelo de transporte Lagrangeano são atribuídos coeficientes de absorção nas fronteiras de terra. Esse coeficiente tem papel de reter ou não uma partícula que atinge a fronteira. Os valores desse coeficiente variam de zero a um, sendo zero com absorção nula, e um, a absorção total das partículas quando tocam a fronteira terrestre.

Esse coeficiente pode variar de acordo com o tipo de fronteira que existe no domínio, podendo ser vegetação ou costões rochosos. Contudo, Rosman (2023) cita que esses coeficientes são empíricos e têm como objetivos diferenciar trechos de fronteiras.

Nesse estudo são utilizados diferentes coeficientes de absorção, permitindo uma análise da localização das possíveis zonas de estagnação. Esse coeficiente é necessário para compreender o movimento das partículas dentro do domínio de modelagem, indicando quais são as regiões com maior tempo de residência e quais as regiões que possuem as maiores concentrações de partículas. Como a condição inicial do modelo, as partículas neutras são dispostas em todo o domínio, com espaçamento de 5 metros entre elas.

O modelo de transporte Lagrangeano também pode ser usado na simulação da trajetória de um traçador dissolvido na coluna d'água, ou em qualquer camada específica da coluna d'água. Sendo assim, é possível usar uma partícula, ou um conjunto de partículas. Pode

ser usado como exemplo, o deslocamento das braquiárias ao longo dos Guaraguaçu e Cambara, utilizando diferentes coeficientes de absorção, e estabelecendo possíveis regiões com maiores ou menores probabilidade de fixação dessa espécie ao longo dos rios Guaraguaçu e Cambara.

O modelo de transporte Euleriano, que por muitas vezes é chamado de modelo de transporte advectivo-difusivo (Rosman, 2023), é um modelo que deve ser utilizado na análise de um único parâmetro de qualidade da água, com comportamento passivo e reativo, ou seja, aceita uma variedade de tipos de reações cinéticas entre o constituinte e a água do meio receptor, e também na análise de processos sedimentológicos e evolução morfodinâmica com sedimentos finos em suspensão. O modelo de transporte advectivo-difusivo médio na vertical também é bastante útil para simulações da distribuição de substâncias ou escalares passivos dissolvidos na coluna de água (Rosman, 2023). Esse modelo utiliza-se da mesma discretização espacial e temporal do modelo hidrodinâmico. Nesse estudo o modelo de transporte Euleriano é usado para calcular a idade da água, em dias, e a porcentagem da taxa de renovação do sistema ao longo do período simulado.

A simulação das concentrações para as substâncias não conservativas ou reativas, é feita estabelecendo os coeficientes de decaimento ou regimento da substância. No caso do marcador de idade, o decaimento é fornecido pela T_{90} , tempo que é necessário para que a substância atinja 10% da sua concentração inicial, ou seja que tenha reduzido 90% de sua concentração inicial. Segundo Rosman (2023), o T_{90} usado para o cálculo da idade da água deve ser igual o período modelado. Como exemplo dessa aplicação, uma simulação que perdura num período de 200 dias, o T_{90} deverá ter esse valor.

Como condição inicial do modelo, é normalmente utilizado a concentração igual a 1,0 mg/L em todo domínio modelado, isso facilitará no cálculo da Idade da Água. Como condições de contorno para os rios afluentes e no contorno aberta, no caso de afluxo, a concentração utilizada é igual a 1,0 mg/L.

Sendo assim, a Idade da água é função da concentração inicial e da taxa de decaimento. Como a condição inicial e as condições de contorno, por terem valores iguais a 1,0 mg/L, devem ter os valores de idade da água iguais a zero. Portanto, passado um período de tempo, com o decaimento da substância e pelos processos advectivos e difusivos, é possível calcular a idade da água em todo o domínio.

O modelo de transporte Euleriano também é capaz de simular as taxas de renovação. Neste cálculo, a concentração inicial do modelo, diferentemente da idade da água, terá que ser atribuída o valor zero em todo o domínio; esse valor será atribuído como taxa de renovação zero. Os valores de concentração nas condições de contorno devem receber ser de 100,0 mg/L,

que é equivalente ao valor de uma taxa de renovação de 100%. Ao longo da simulação, ocorrerá os processos de advecção e difusão, diminuindo assim as concentrações e fornecendo um parâmetro para os valores da taxa de renovação, em %. Nesta simulação, a substância é considerada conservativa.

3.5 CAMPANHA DE CAMPO

No dia 12 de julho de 2022 foi realizada uma campanha de campo no rio Guaraguaçu, coletando dados batimétricos e de salinidade como suporte à modelagem ambiental do sistema.

O equipamento usado na medição da batimetria foi o GPS e um Sonar Fishfinder Garmin STRIKER 5dv CHIRP (c/Transducer GT20-TM). Este dispositivo foi utilizado para realizar medições de profundidade em diversos pontos ao longo do rio Guaraguaçu. Esse equipamento funciona como um ecobatímetro, possuindo uma haste que permite, a cada ponto, a emissão sonora das ondas, possibilitando a medição da profundidade nos locais. Esse equipamento é amplamente usado na atividade de pesca, permitindo a detecção de peixes dentro da água. A Figura 25 mostra a localização dos pontos onde ocorreram as medições.

Esta campanha ocorreu em um único dia, permitindo que apenas alguns pontos ao longo dos rios Guaraguaçu e Cambará fossem monitorados. Regiões mais a montante não foram contempladas, devido à dificuldade de acesso e à baixa lâmina d'água no dia e hora da campanha.

Durante a campanha de campo foi possível verificar a entrada da onda de maré nas regiões mais interna do rio Cambará, inclusive no momento em que foi feita a incursão no rio Cambará houve dificuldade de navegabilidade devido à baixa profundidade. Horas depois, no trajeto de volta, em direção ao rio Guaraguaçu, ocorreu uma significativa elevação do nível do rio, permitindo assim, a navegabilidade no canal que anteriormente estava muito raso, impedindo a navegabilidade.

No levantamento batimétrico, os valores obtidos incluem a maré no instante da medição. Para eliminar os efeitos de maré, foi adotado de um plano de referência, o nível médio do mar (NMM), que é o nível de referência utilizado no modelo hidrodinâmico do SisBaHia.

A eliminação dos efeitos de maré foi realizada usando como base a curva de maré obtida pelo modelo de circulação, a partir do trabalho de Polli et al. (2021), na embocadura do rio Guaraguaçu, no dia 12 de junho (Figura 26). Portanto, os dados batimétricos coletados foram corrigidos e referenciados ao nível médio do mar.

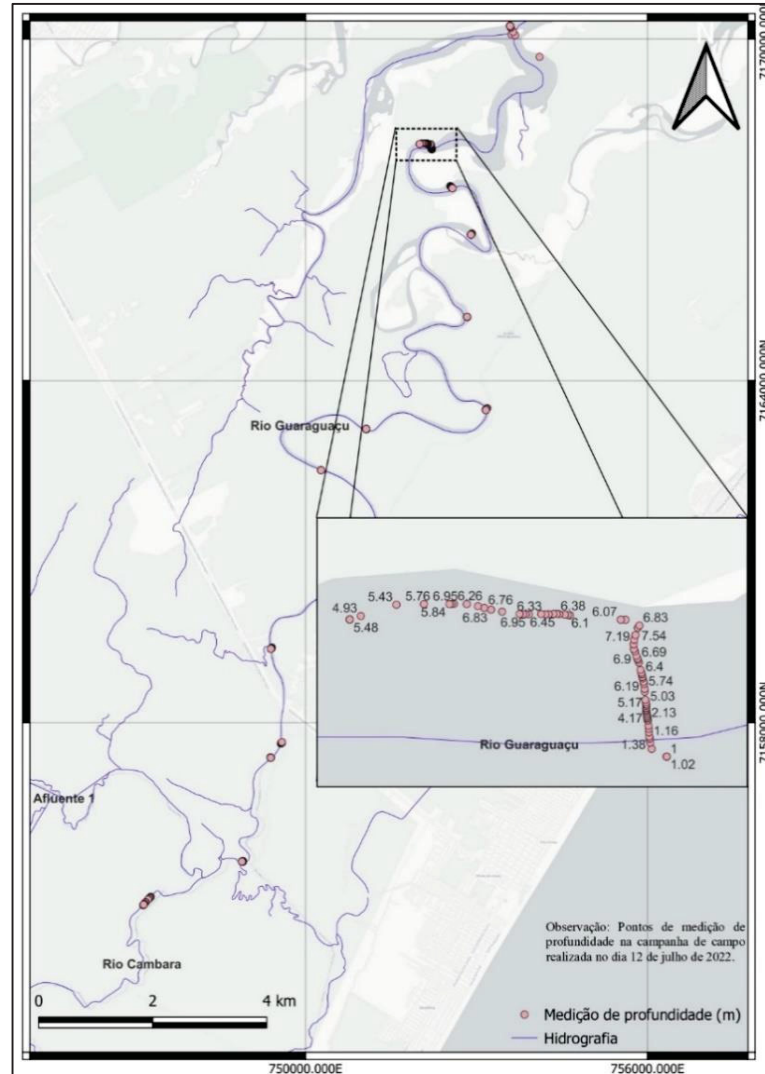


Figura 25 – Pontos de medição e valores de profundidade medidos na campanha de campo com detalhe para a região próxima a volta grande (Fonte: Autor).

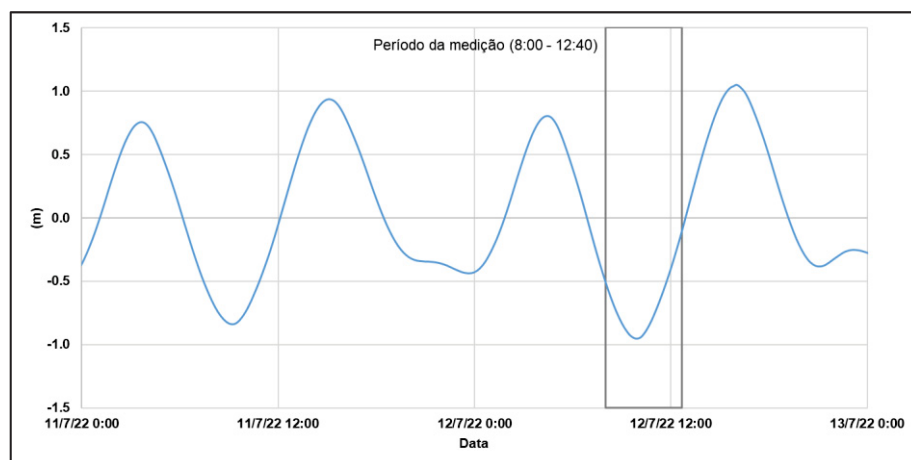


Figura 26 – Curva de maré prevista para o 12 julho de 2022, obtida a partir das constantes harmônicas definidas por simulação hidrodinâmica do Complexo Estuarino de Paraguá a jusante do rio Guaraguau. Fonte: Adaptado Polli et. al (2021).

A medição dos dados de salinidade utilizou o sensor Horiba U-53G. Esse medidor possibilita as medições de pH, condutividade, potencial de oxidação-redução, sólidos totais dissolvidos, salinidade, temperatura, turbidez, oxigênio dissolvido e pressão atmosférica. Para a salinidade, o erro do equipamento é de $\pm 0,1$ ups. A Figura 27 apresenta os pontos de salinidade medidos na campanha de campo com os valores de concentração e o horário da medição. As medições também foram feitas em diferentes pontos na coluna d'água, não apresentando gradiente de salinidade na vertical. Essas medições indicam a utilização de um modelo bidimensional integrado na vertical para representar a intrusão salina no rio Guaraguaçu. Contudo, vale ressaltar que as medições ocorreram num período de estiagem com baixa vazão fluvial, o que pode influenciar no gradiente de salinidade na vertical.

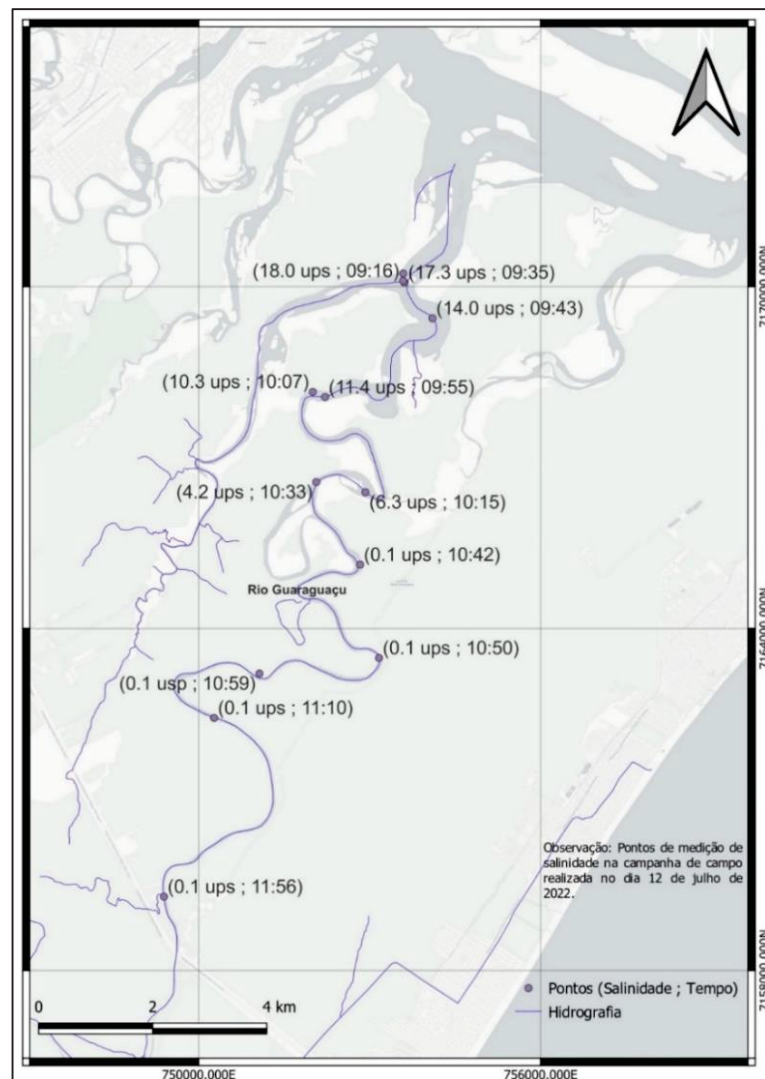


Figura 27 – Pontos de medição, valores de salinidade e horário das medições realizadas no rio Guaraguaçu na campanha de campo. (Fonte: Autor)

3.6 DADOS DO MODELO HIDRODINÂMICO

Nesta seção são descritos os dados utilizados no modelo de circulação hidrodinâmica para o rio Guaraguaçu. Os dados usados no modelo para o CEP podem ser consultados em Polli et al. (2021).

Os dados de elevação da superfície livre e de salinidade usados como condição de contorno nos modelos hidrodinâmico e de qualidade da água do rio Guaraguaçu foram definidos usando a base desenvolvida e usada por Polli et al. (2021) para o CEP (Complexo Estuarino de Paranaguá), calibrada para o ano de 2001 em três estações - Canal Galheta, Porto de Paranaguá - Cais Oeste e Ponta do Félix. Esta malha apresenta 1841 elementos, contendo 1828 quadrangulares e 13 triangulares, e com 8391 nós. A Figura 28 apresenta a malha de elementos finitos e a indicação do local onde foram extraídos os dados de elevação da superfície livre e de salinidade como condição de contorno para o modelo hidrodinâmico e de qualidade da água do rio Guaraguaçu.

A malha do CEP contempla uma região do rio Guaraguaçu, permitindo assim uma melhor definição da salinidade em virtude da variação da superfície livre. Isso fará com que os processos de misturas que ocorrem no rio Guaraguaçu sejam melhor representados fornecendo assim, condições de contorno mais acuradas para os modelos desenvolvidos nos rios Guaraguaçu e Cambará.

O domínio de modelagem usado para representar as principais regiões dos rios Guaraguaçu, Cambará e Pery, região ambientalmente mais degradada em relação à qualidade da água, pode ser observada na Figura 29.

A malha de elementos finitos quadrangulares biquadráticos foi definida na caracterização espacial do domínio da modelagem de aproximadamente 4.480.433 m². A malha, apresentada na Figura 29, contém 2801 elementos quadrangulares com 13900 nós. O domínio contempla a região denominada “Caxetal”, região mais interna da área de estudo. Na análise utilizou-se uma discretização bidimensional, para caracterizar as correntes secundárias e os perfis transversais de velocidade no talvegue e a região próxima as margens (Estigoni, 2016).

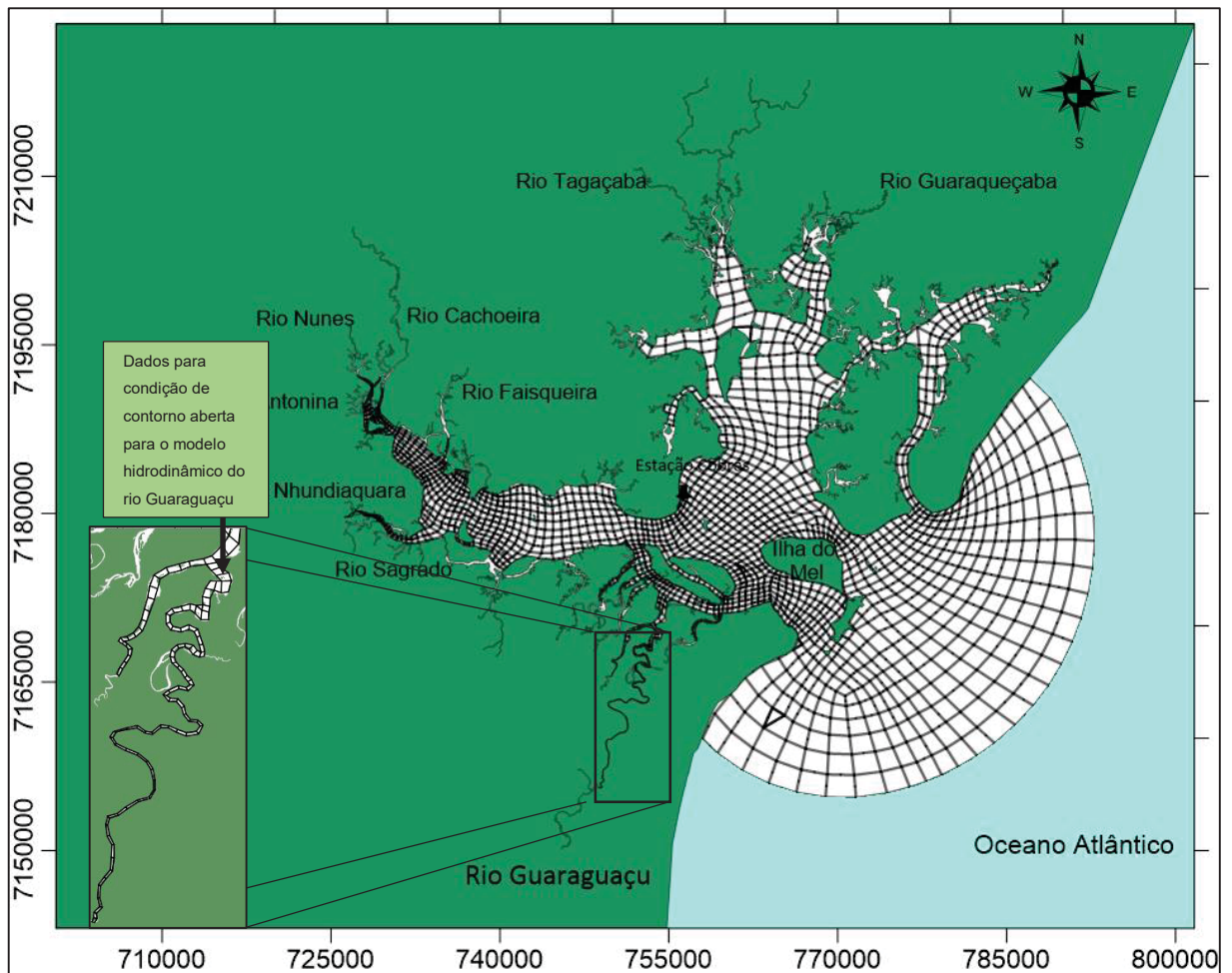


Figura 28 – Malha de elementos finitos para o CEP (Fonte: Adaptado Polli, 2021)

Os valores de vazão foram calculados pelo modelo hidrológico SWAT em seis pontos, caracterizando o aporte fluvial das bacias de contribuição do sistema. Os locais destes aportes estão indicados na Figura 29: rio Guaraguaçu, rio Cambara, rio Indaial, rio do Meio, um afluente montante (sem denominação da base de dados) e o rio Pery.

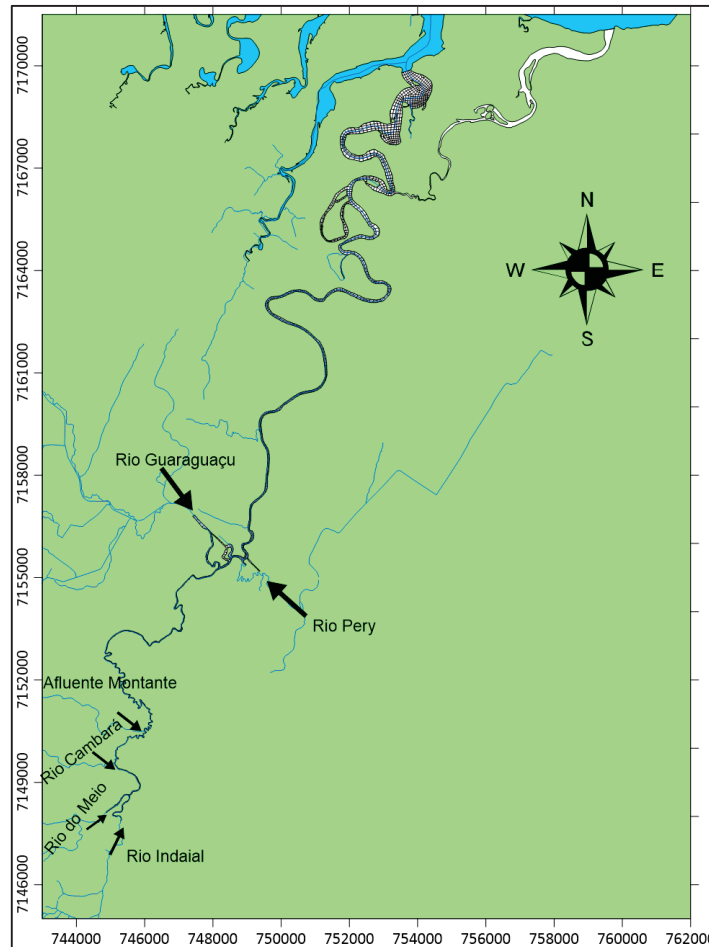


Figura 29 – Malha de elementos finitos no domínio de modelagem do rio Guaraguau e afluentes (Fonte: Autor).

A Figura 30 mostra, em detalhe, a malha de elementos finitos em algumas regiões: embocadura, confluência dos rios Guaraguau, Cambará e Pery, os rios Indaial, rio do Meio e a região conhecida como Caxetal.

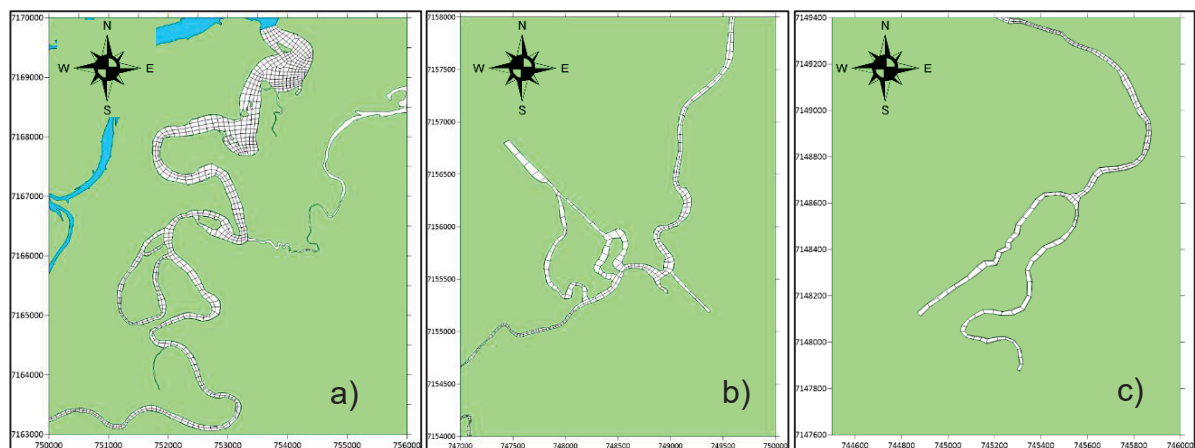


Figura 30 – Visualização da malha de elementos finitos em algumas regiões do domínio, sendo a) região da embocadura, b) confluência dos rios Guaraguau, Cambará e Pery e c) região conhecida como Caxetal (Fonte: Autor).

A partir dos dados batimétricos obtidos em campo, optou-se por definir seções transversais nos pontos de medições, possibilitando assim a interpolação ao longo de todo o rio Guaraguaçu. Foi utilizado o programa HEC-RAS para criar as seções e interpolá-las, com auxílio do Modelo Digital de Elevação descrito anteriormente. Após a implementação da batimetria no SiBaHiA, foram corrigidos alguns valores de profundidade manualmente.

A Figura 31 apresenta uma visão geral da batimetria, seguindo a referência do modelo, $z = -h$, interpolada para o rio Guaraguaçu e afluente, apresentando algumas regiões com mais detalhe: a região do Caxetal, com valores próximos a 0,2 m, e as regiões próximas à embocadura, com valores superiores à 8,0 m.

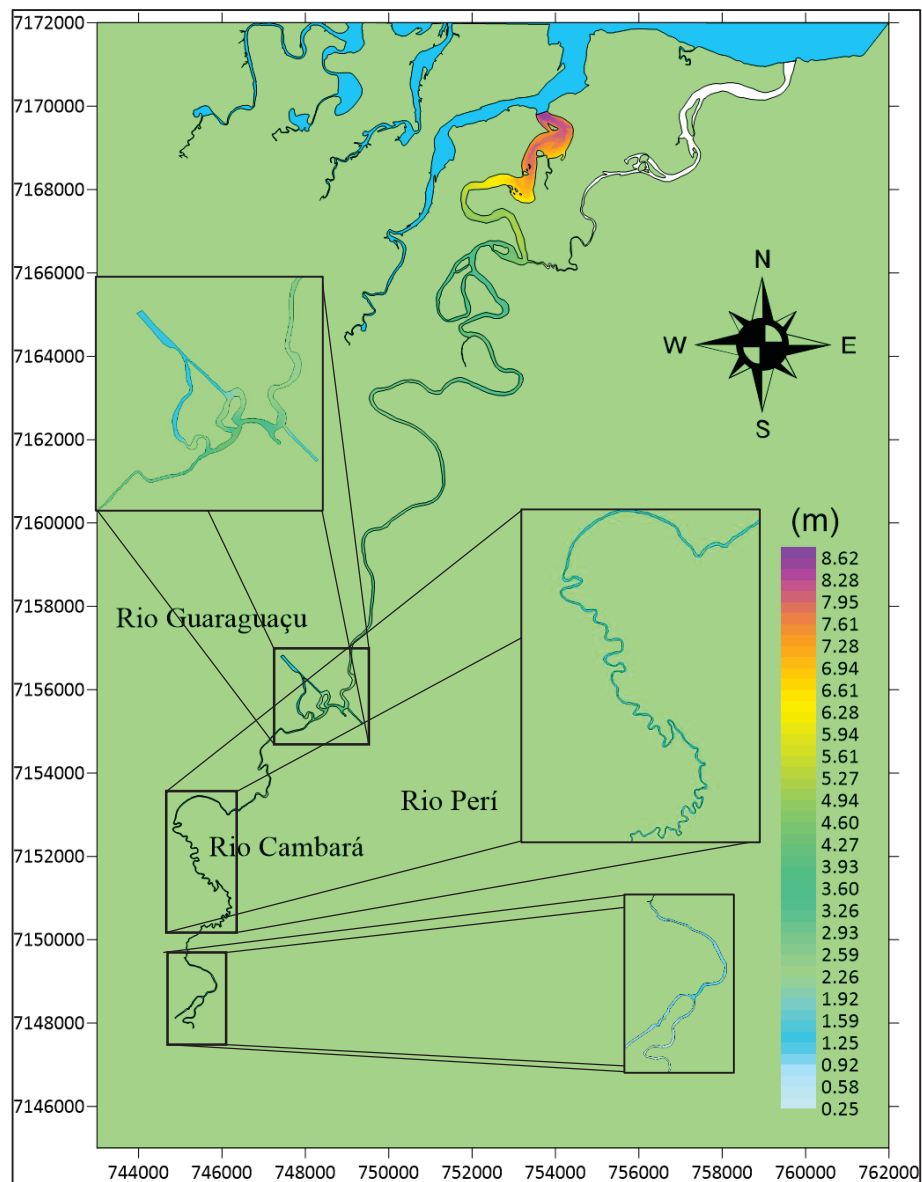


Figura 31 – Isolinhas da topografia de fundo, em metros (Fonte: Autor).

A Figura 32 apresenta o perfil longitudinal, com os valores negativos indicando cota de fundo, em relação ao nível médio do mar, para a região mais interna do rio Guaraguaçu até a região da embocadura. O domínio de modelagem possui aproximadamente 43,0 km de extensão. A região, distante 15,0 km da região do Caxetal, é uma região mais profunda, e corresponde à confluência entre o rio Guaraguaçu e o rio Pery, local com a maior presença de braquiárias.

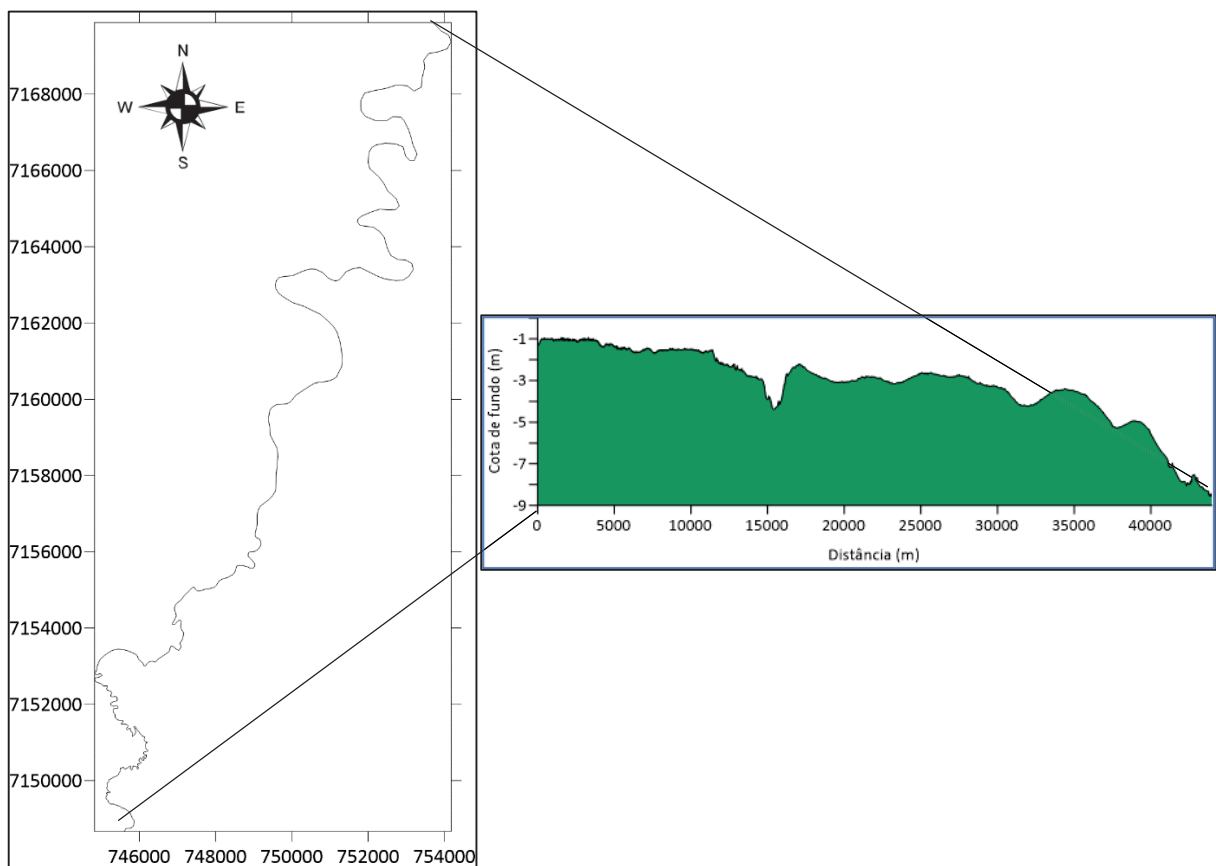


Figura 32 – Perfil longitudinal dos valores de cota de fundo em relação ao nível médio do mar para o rio Guaraguaçu (Fonte: Autor).

Segundo Elset et al. (2019), o trecho final do rio Guaraguaçu, ao encontrar com barramento formado pelos cordões litorâneos da planície costeira, apresenta um ambiente lótico com características distintas dos trechos a montante dos rios afluentes. Nessa região, o rio desvia-se ao norte em direção à baía de Paranaguá, resultando em uma extensa planície de inundação com padrão meândrico, lagoas marginais e áreas alagadas. O ambiente é praticamente estuarino, influenciado pela salinidade e pelas variações da maré. O substrato é composto por sedimentos finos e lodo, indicando áreas de deposição para toda a extensão da região mais plana do rio Guaraguaçu.

Assim, considerando a pouca disponibilidade de dados, optou-se por utilizar a amplitude de rugosidade de 0,015 m, que corresponde ao fundo de areia fina, nas regiões mais internas do rio e 0,020 m, que corresponde à predominância de areia média, nas regiões próximo a embocadura. A categorização observou a classificação feita por Basco (1989) e adaptado por Rosman (2023), mostrada na Tabela 10.

Tabela 8 – Valores sugeridos para amplitude equivalente de fundo (Rosman, 2023), adaptado Abbot e Basco (1989)

Leito de sedimentos com rugas e similares	
Predominância de siltes e finos	$0.0001\text{m} < \varepsilon < 0.0100\text{m}$
Predominância de areias finas	$0.0070\text{m} < \varepsilon < 0.0150\text{m}$
Predominância de areias médias	$0.0100\text{m} < \varepsilon < 0.0300\text{m}$
Predominância de areias grossas	$0.0250\text{m} < \varepsilon < 0.0500\text{m}$
Predominância de areias muito grossas	$0.0400\text{m} < \varepsilon < 0.0800\text{m}$
Predominância de areias com cascalho	$0.0500\text{m} < \varepsilon < 0.1200\text{m}$
Sedimentos com vegetação	$0.0500\text{m} < \varepsilon < 0.1500\text{m}$
Sedimentos com obstáculos (e.g. pedras, troncos)	$0.1500\text{m} < \varepsilon < 0.4000\text{m}$
Fundo de pedra ou rochoso	
Fundo de alvenaria	$0.0003\text{m} < \varepsilon < 0.0010\text{m}$
Fundo de pedra lisa	$0.0010\text{m} < \varepsilon < 0.0030\text{m}$
Fundo de asfalto ou similar	$0.0030\text{m} < \varepsilon < 0.0070\text{m}$
Fundo com pedregulho ($d_{50} < 3 \text{ cm}$)	$0.0070\text{m} < \varepsilon < 0.0150\text{m}$
Fundo com pedras médias ($d_{50} < 8 \text{ cm}$)	$0.0150\text{m} < \varepsilon < 0.0400\text{m}$
Fundo com pedras ($d_{50} < 20 \text{ cm}$)	$0.0400\text{m} < \varepsilon < 0.1000\text{m}$
Fundo com rochas ($d_{50} < 50 \text{ cm}$)	$0.1000\text{m} < \varepsilon < 0.2500\text{m}$
Fundo de Concreto:	
Fundo de concreto liso	$0.0001\text{m} < \varepsilon < 0.0005\text{m}$
Fundo de concreto inacabado	$0.0005\text{m} < \varepsilon < 0.0030\text{m}$
Fundo de concreto antigo	$0.0030\text{m} < \varepsilon < 0.0100\text{m}$

3.7 CENÁRIOS DE MODELAGEM

Foram definidos dois cenários para as simulações hidrodinâmica e de qualidade da água nesse estudo. Os cenários hidrodinâmicos foram determinados a partir da observação do regime pluviométrico da região, definindo um período seco e outro chuvoso.

Segundo as médias mensais dos dados pluviométricos da estação ETA-Matinhos, ficou definido o cenário seco o mês de julho de 2022 e, o cenário chuvoso, o mês de fevereiro de 2020. As Figura 33 e Figura 34 apresentam as séries diárias de precipitação medida nos meses correspondentes. O maior valor do mês chuvoso foi de 144,0 mm, no dia 08/02, representando aproximadamente 22% da chuva do mês. No mês seco, observa-se uma irregularidade na

distribuição de chuva, com um período de 16 dias sem chuva, e apenas 4 dias com ocorrência de chuvas, variando de 1,6 mm, no dia 17/07, à 9,0 mm, no dia 20/07.

Nas simulações do tempo de residência foram definidos dois cenários para cada cenário hidrodinâmico, seco e chuvoso, com diferentes coeficientes de absorção. A Tabela 9 apresenta um esquema representativo dos cenários definidos no estudo.

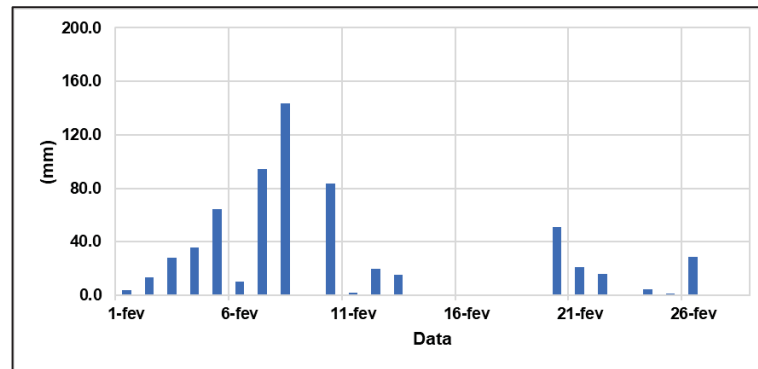


Figura 33 - Série diária de altura de chuva para o mês de fevereiro/2020 medida na estação ETA-Matinhos (Fonte: Autor).

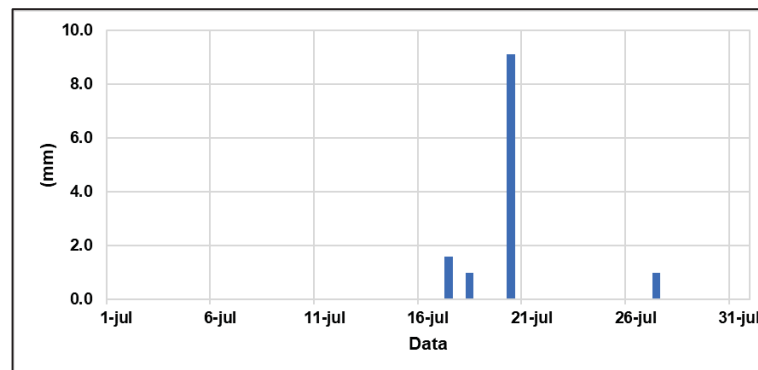


Figura 34 – Série diária de altura de chuva para o mês de julho/2022 medida na estação ETA-Matinhos (Fonte: Autor)

Tabela 9 – Cenários da modelagem hidrodinâmica e hidrológica

Período	Modelos	
	Hidrodinâmico, Qualidade da Água e Euleriano	Lagrangiano
Julho de 2022	Seco	Coefficiente de absorção igual a 0
		Coefficiente de absorção igual a 1
Fevereiro de 2020	Chuvoso	Coefficiente de absorção igual a 0
		Coefficiente de absorção igual a 1

(Fonte: Autor)

4 RESULTADOS

Nessa seção são apresentados os resultados dos modelos hidrodinâmico e de qualidade da água para o CEP e para o rio Guaraguaçu. Também são apresentados os resultados do modelo hidrológico para os afluentes ao rio Guaraguaçu e os resultados dos modelos de transporte Euleriano e Lagrangeano para o rio Guaraguaçu.

4.1 SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA

A Tabela 10 mostra os intervalos disponíveis das estações pluviométricas e fluviométricas, destacando os dias e os meses de início e fim das medições. O período entre agosto de 2008 a julho de 2009, que corresponde à um ano hidrológico, foi escolhido como período de calibração. A Figura 35 apresenta a série de vazões calculadas pelo modelo e os valores observados na sub-bacia 14, local de monitoramento da estação fluviométrica, juntamente com os valores de altura de chuva no período.

Tabela 10 – Esquema dos períodos dos dados para as estações utilizadas no estudo.

ANOS											
1990 - 1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010 - 2022
Estação climatológica											
				20/12	Estação fluviométrica					30/11	
								14/1	Estação pluviométrica		

(Fonte: Autor).

Comparando as séries temporais medidas com os resultados calculados pelo SWAT, observa-se uma boa concordância de fase. No que se refere à amplitude, há uma atenuação maior nos valores obtidos pelo SWAT em relação aos valores medidos. Os valores de coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) e erro padrão normalizado (RSR) indicam uma correlação satisfatória. Os valores obtidos para o NSE foi 0,551 e 0,602 para o RSR. Para o percentual de tendência (PBias), o valor encontrado foi 11,572, indicando um ajuste bom. Observa-se também que o modelo não conseguiu representar adequadamente os períodos de recessão. Uma das possíveis causas são as condições iniciais do modelo hidrológico, principalmente dos dados de pedologia, que foram adaptados para o uso da modelagem que podem influenciar na recarga do rio com o escoamento subterrâneo do lençol freático. Outro motivo pode ser pela distância entre a estação pluviométrica, mais próxima do mar, e a estação fluviométrica, que se encontra perto

da Serra da Prata, não sendo uma chuva representativa para a modelagem representativa na série temporal.

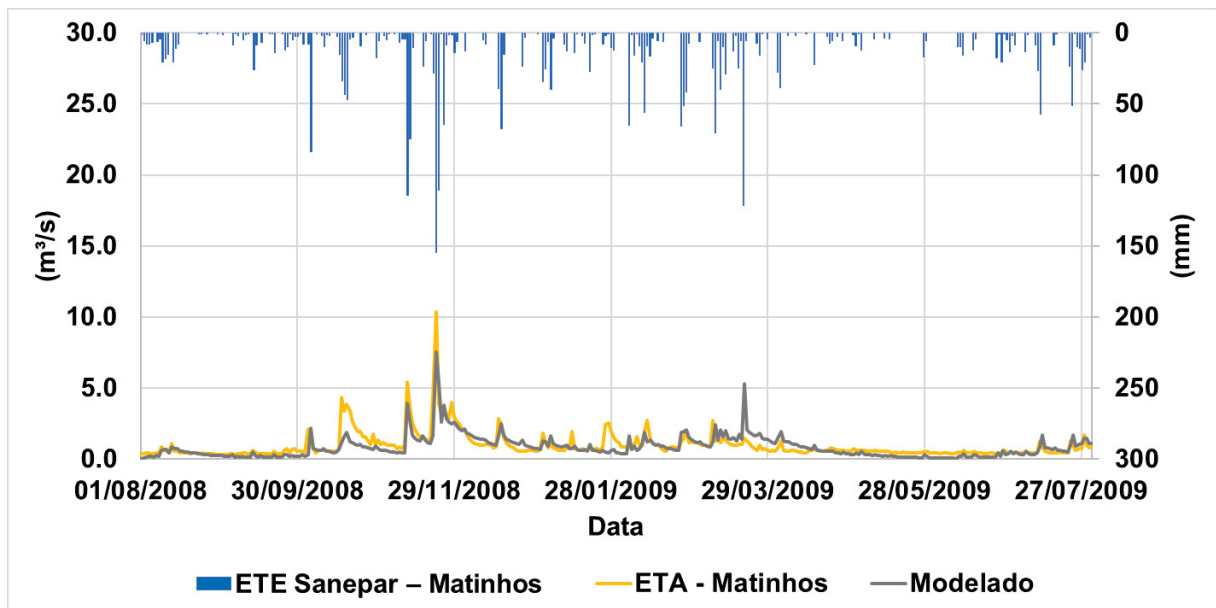


Figura 35 – Altura de chuva medida e valores diários de vazões calculadas pelo SWAT para o período de calibração (Fonte: Autor).

É possível determinar vazões diárias para todos os rios da bacia do rio Guaraguaçu nos períodos seco e chuvoso, a partir do modelo hidrológico calibrado. A Figura 36 apresenta as séries diárias das vazões calculadas entre agosto de 2008 e dezembro de 2022, com destaque aos período selecionado para os cenários hidrodinâmicos. Nota-se que as maiores vazões são observadas no rio Guaraguaçu, seguida do rio Cambará. Observa-se também picos de vazão, com valores de $70,0 \text{ m}^3/\text{s}$ no rio Guaraguaçu, e uma grande variação de vazão entre os períodos seco e chuvoso.

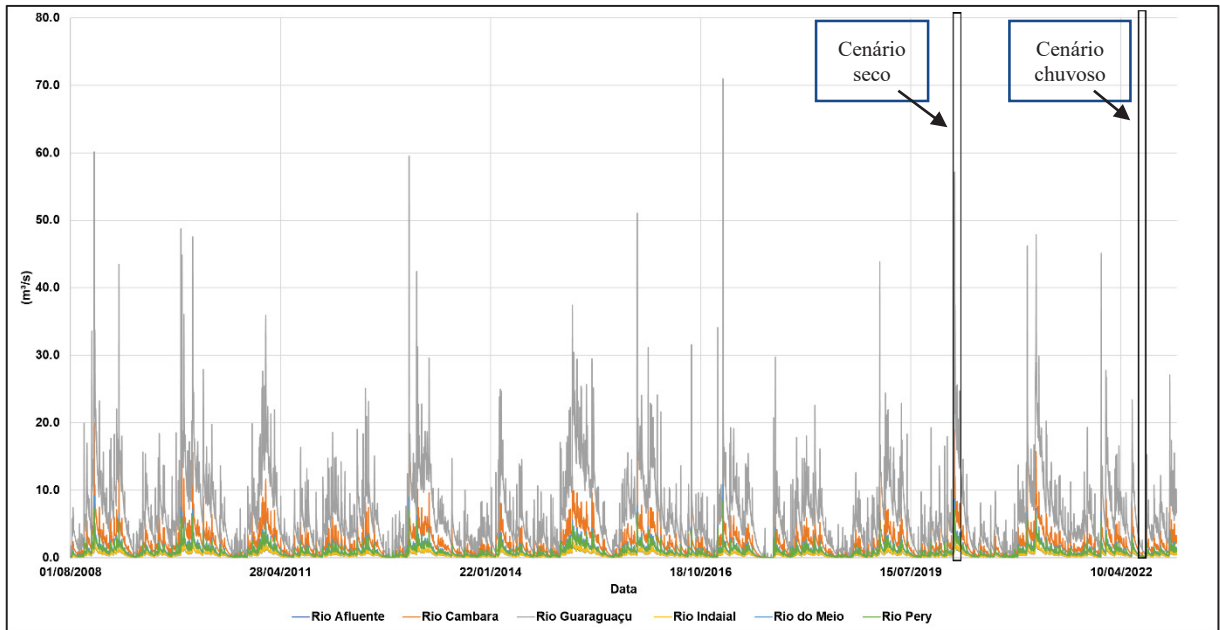


Figura 36 – Valores diários de vazões calculadas pelo SWAT para rios pertencentes a bacia do rio Guaraguaçu, com destaque para os períodos usados na modelagem hidrológica (Fonte: Autor).

A Figura 37 apresenta os resultados das vazões médias mensais calculadas pelo modelo hidrológico entre agosto de 2008 e dezembro de 2022. As maiores médias são no rio Guaraguaçu, seguida do rio Cambará, acontecendo nos meses de janeiro e dezembro, com valores de $11,00 \text{ m}^3/\text{s}$ e $9,75 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente. Os rios Indaial e o rio Afluente são os que apresentam as menores vazões médias, com valores próximos de $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$, no período chuvoso.

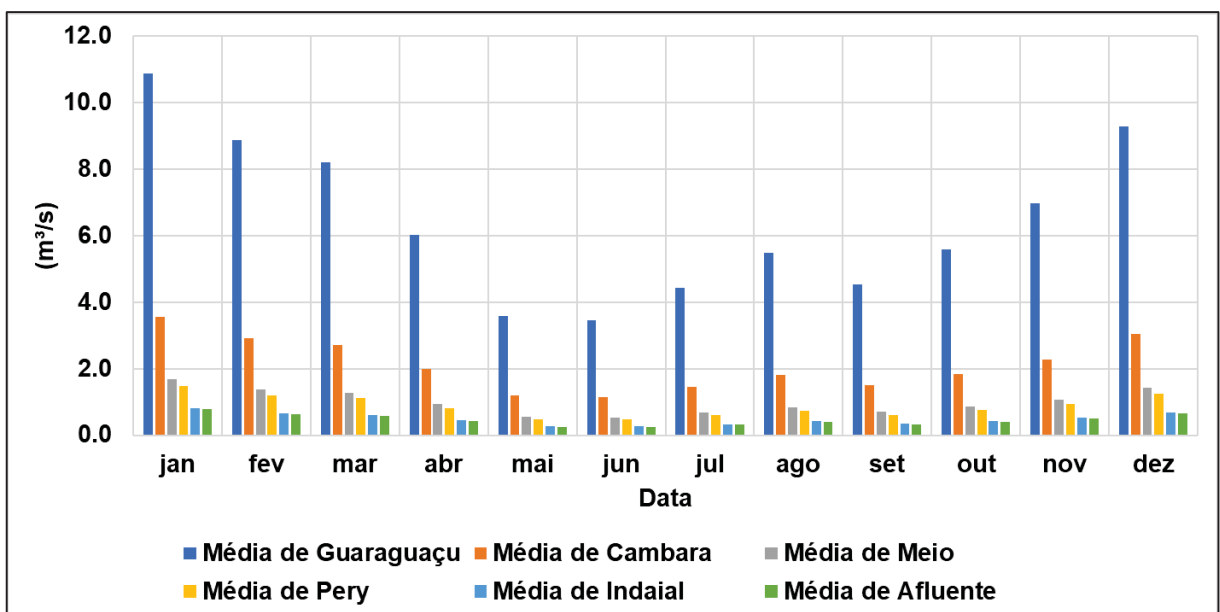


Figura 37 – Vazões médias mensais calculadas pelo SWAT para rios pertencentes a bacia do rio Guaraguaçu entre agosto de 2008 e dezembro de 2022 (Fonte: Autor).

As vazões calculadas no cenário chuvoso podem ser visualizadas na Figura 38. Durante esse período, a maior vazão ocorreu no dia 08/02/2020, com valores de aproximadamente $60,0 \text{ m}^3/\text{s}$ no rio Guaraguaçu. Após o pico de vazão do dia 10/02/2020, observa-se uma distribuição irregular da chuva neste período, com uma tendência de declínio dos valores de vazão em direção ao final do período analisado.

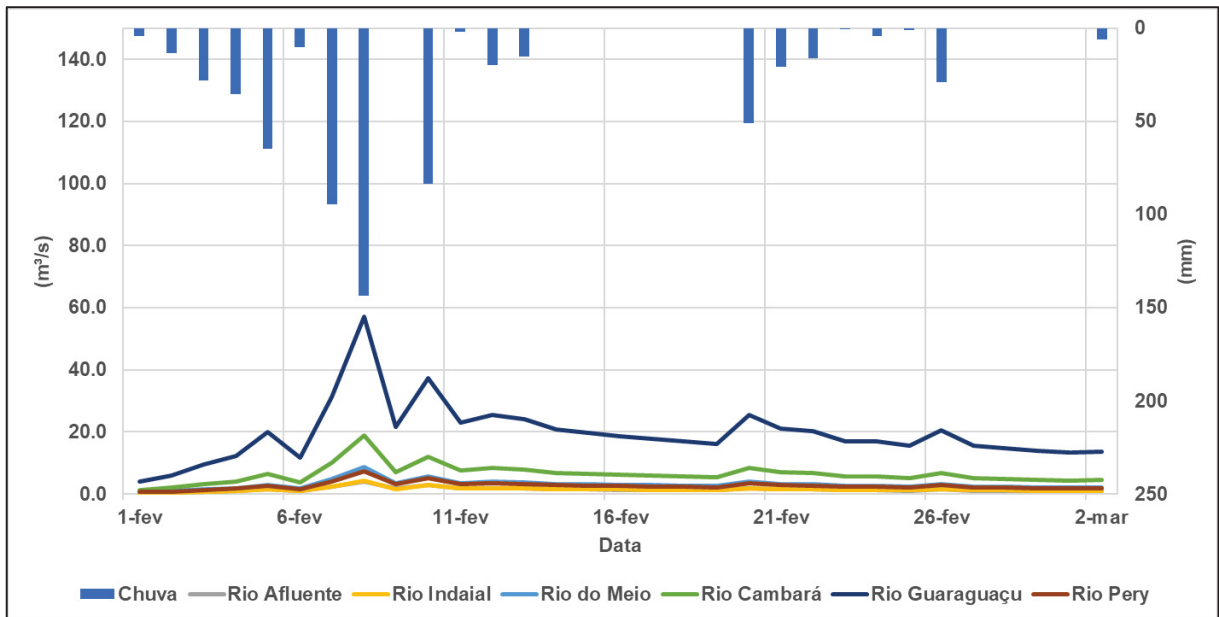


Figura 38 - Altura de chuva medida e valores diários de vazões calculadas pelo SWAT nos rios pertencentes a bacia do rio Guaraguaçu no cenário chuvoso, fevereiro de 2020 (Fonte: Autor).

A Figura 39 apresenta as vazões diárias no cenário seco. Nota-se que as maiores vazões ocorrem no início da série, no rio Guaraguaçu, com $3,5 \text{ m}^3/\text{s}$, seguidos do rio Cambará e Pery. Essas vazões são provenientes das chuvas que antecederam esse período. Somente no 17/07/2022 houve precipitação, possibilitando um aumento das vazões dos rios afluentes, com valores próximos aos $3 \text{ m}^3/\text{s}$ no rio Guaraguaçu.

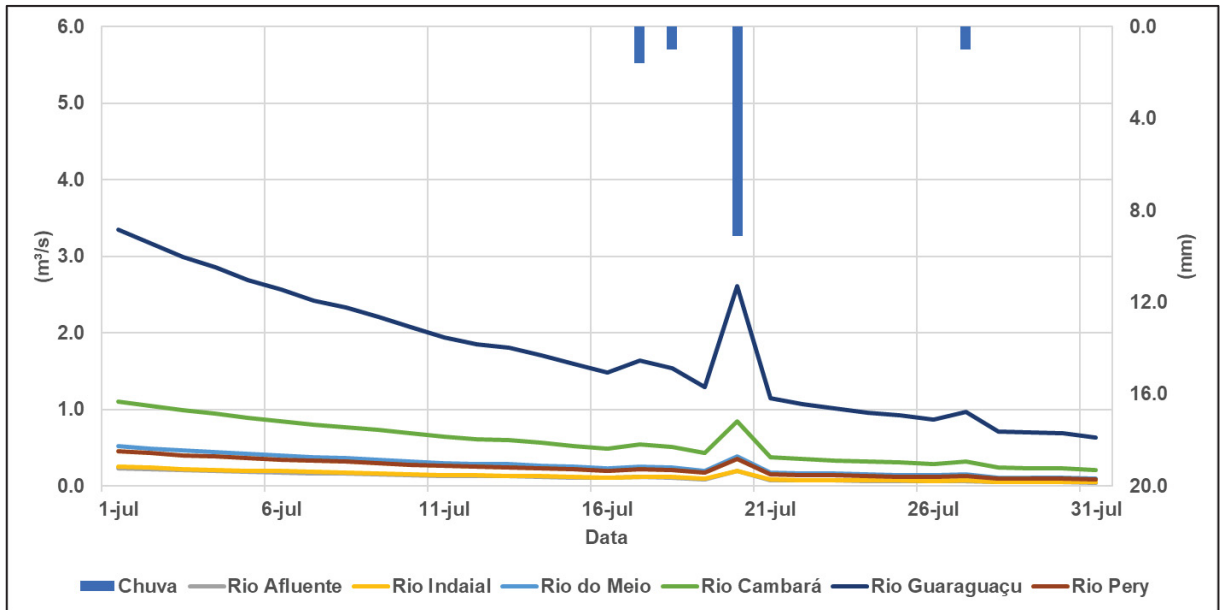


Figura 39 – Altura de chuva medida e valores diários de vazões calculadas pelo SWAT nos rios pertencentes a bacia do rio Guaraguaçu no cenário seco, julho de 2022 (Fonte: Autor).

4.2 SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA

Os resultados obtidos na modelagem hidrodinâmica do CEP foram usados como condição de contorno na modelagem do rio Guaraguaçu. As Figura 40 e Figura 41 apresentam os valores de elevação e salinidade obtidos pelo SisBaHiA, respectivamente, na embocadura do rio Guaraguaçu, entre 01/07/2022 e 31/07/2022.

Os valores de salinidade variam de 15,0 e 21,0 ups, em diferentes momentos da maré de sizígia e quadratura, seguindo as oscilações da elevação da superfície livre. Os períodos de quadratura são os que apresentam menores oscilações nas concentrações de sal. Há um aumento gradativo da salinidade, que pode ser relacionado aos baixos valores de vazões, permitindo que uma maior quantidade de sal entre no sistema.

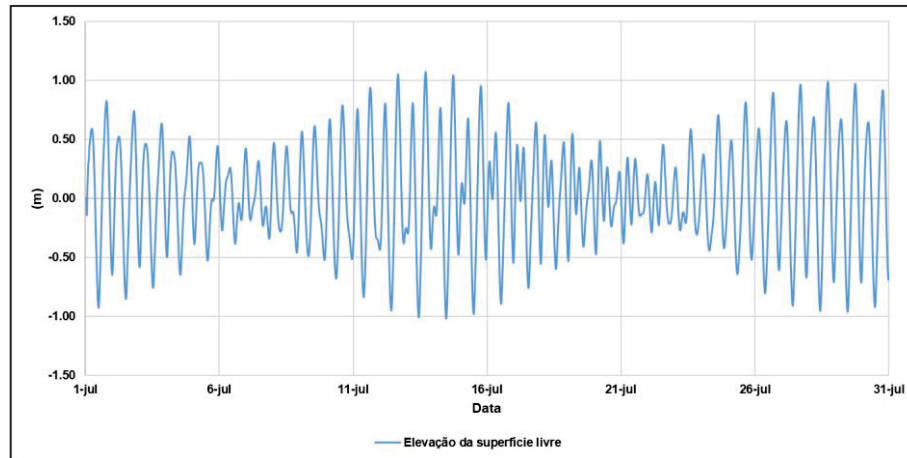


Figura 40 – Valores de elevação da superfície livre (m) na embocadura do rio Guaraguaçu, em julho de 2022 (Fonte: Autor).

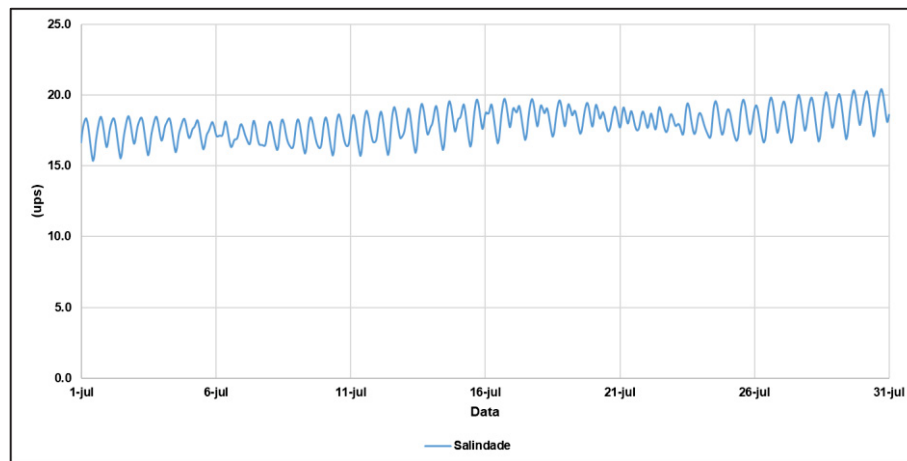


Figura 41 – Valores de salinidade (ups) na embocadura do rio Guaraguaçu, em julho de 2022 (Fonte: Autor).

As Figura 42 e Figura 43 apresentam os valores de elevação e salinidade na embocadura do rio Guaraguaçu, entre os dias 01/02/2020 e 02/03/2020 no cenário chuvoso. A concentração de sal tem uma diminuição ao longo do período, que está relacionada ao aumento das vazões a partir do dia 08/02/2020. Esse resultado indica que o aporte fluvial é forçante importante no processo da intrusão salina do rio Guaraguaçu, impedindo que os valores de salinidade permaneçam altos durante o período.

A salinidade no início do período apresenta valores próximos de 16,0 ups, diminuindo gradativamente no período de quadratura. No período de sizígia os valores ficaram entre 13,0 e 7,0 ups, com aumento da oscilação. A influência do aporte fluvial é evidente, com o aumento gradativo dos valores da salinidade a partir de 13/02/2020, quando ocorre uma diminuição nos valores de vazões.

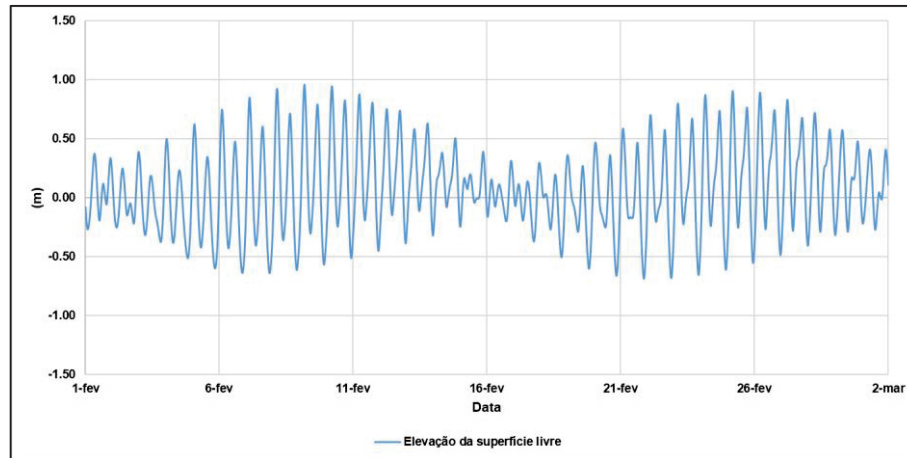


Figura 42– Valores de elevação da superfície livre (m) na embocadura do rio Guaraguaçu, em fevereiro de 2020 (Fonte: Autor).

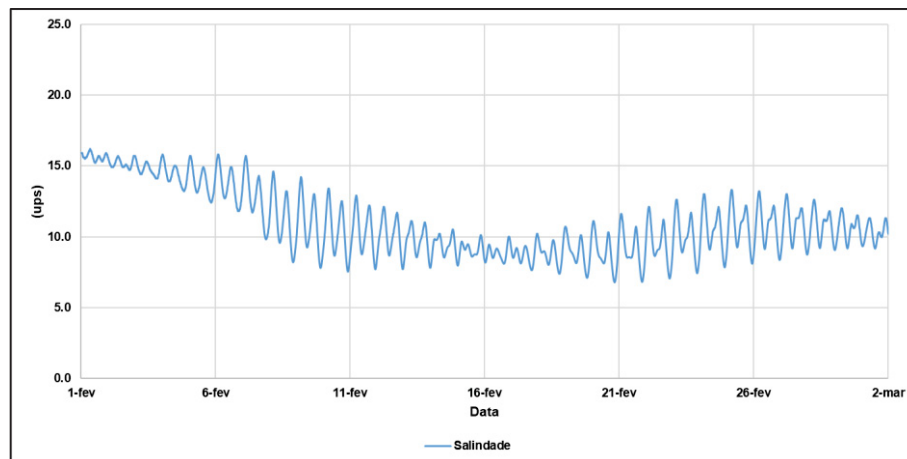


Figura 43 – Valores de salinidade (ups) na embocadura do rio Guaraguaçu, em fevereiro de 2020 (Fonte: Autor).

Os resultados do modelo hidrodinâmico no rio Guaraguaçu são apresentados separadamente em diferentes regiões, considerando que as variações de vazão podem influenciar os valores da elevação da superfície livre e, conseqüentemente, a circulação.

A localização das estações de monitoramento, estações C, G, I, P e Z, onde os resultados do modelo são mostrados, representam as diferentes regiões do rio Guaraguaçu, como pode ser observado na Figura 44. A estação C está localizada na região mais próxima da embocadura. A estação G marca a região que limita a entrada de sal no rio Guaraguaçu. A estação I está localizada na confluência entre os rios Guaraguaçu, Cambará e Pery. A estação P abrange os canais do rio Guaraguaçu e a influência do rio Cambará. Por último, a estação Z está situada na região do Caxeta.

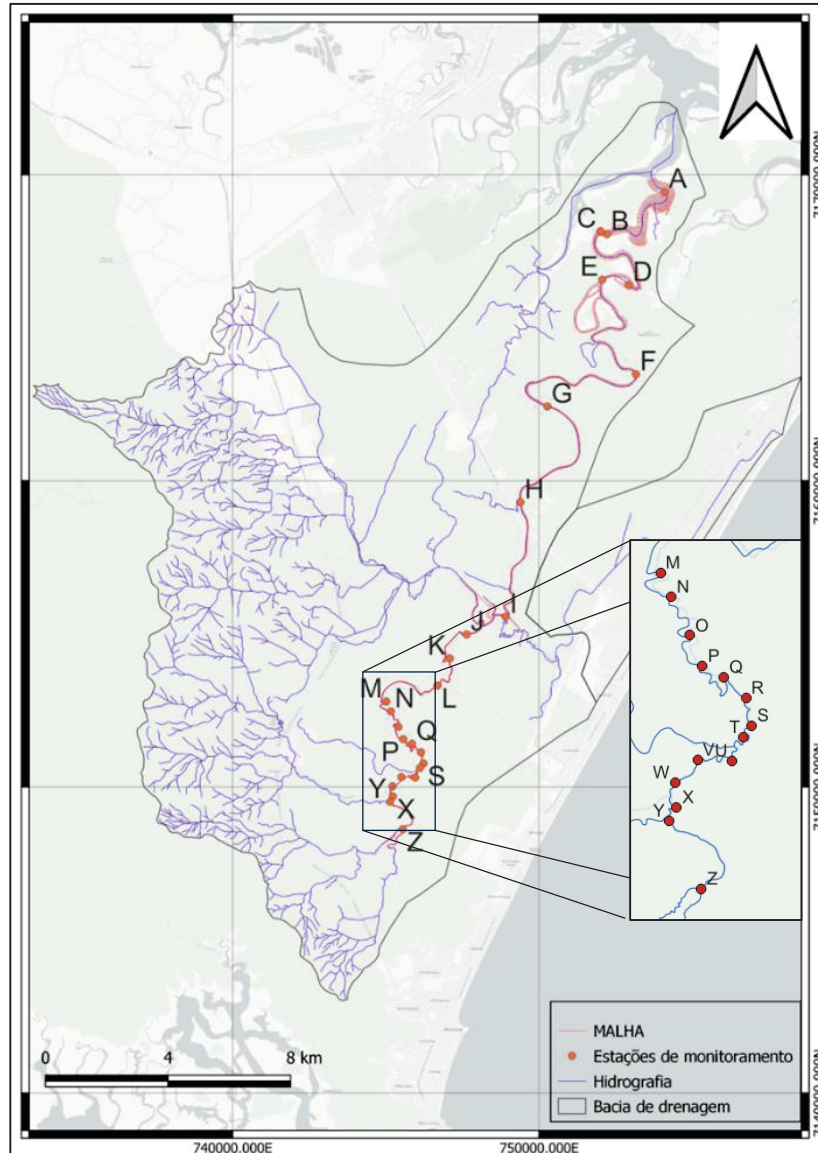


Figura 44 – Localização das estações de monitoramento do modelo hidrodinâmico do rio Guaraguaçu e Cambará. (Fonte: Autor)

As simulações da circulação hidrodinâmica para os períodos foram realizadas usando o SisBaHiA[®], com um Δt (intervalo de tempo) de 5,0 segundos, gerando um número de Courant máximo de 8,7 e médio de 2,4. As Figura 45 e Figura 46 mostram as séries temporais da posição da superfície livre obtidas pelo SisBaHiA[®] nos períodos de sizígia (10/07/2022 à 16/07/2022) e quadratura (18/07/2022 à 24/07/2022), respectivamente, em cinco estações dentro do rio Guaraguaçu (a localização pode ser observada na Figura 44), durante o período seco. Os resultados confirmam que o canal funciona como um filtro, amortecendo a onda de maré na região da estação Z, distante da embocadura, onde a oscilação de maré é pequena, bastante amortecida quando comparada com à região da embocadura (estação C). As estações G, I e P,

localizadas no meio dos canais, também sofrem amortecimento da onda, mas em menor intensidade.

Esse comportamento é comum em estuários estreitos indicando que a perda de carga é maior no interior do estuário, consequência da menor profundidade destes canais. Certamente problemas com a definição da geometria, da batimetria e da rugosidade de fundo dos canais podem gerar um amortecimento maior ou menor da onda de maré. A correta caracterização destes canais é essencial para que os resultados obtidos pelo modelo possam ter uma boa acurácia. O mesmo comportamento pode ser observado no período quadratura.

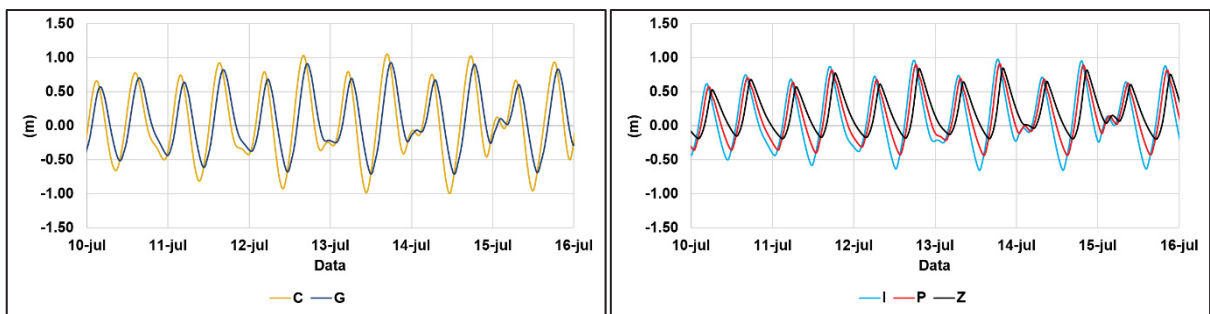


Figura 45 - Elevação da superfície livre para as estações de monitoramento da modelagem hidrodinâmica do rio Guaraguaçu no período de sizígia no cenário seco (Fonte: Autor).

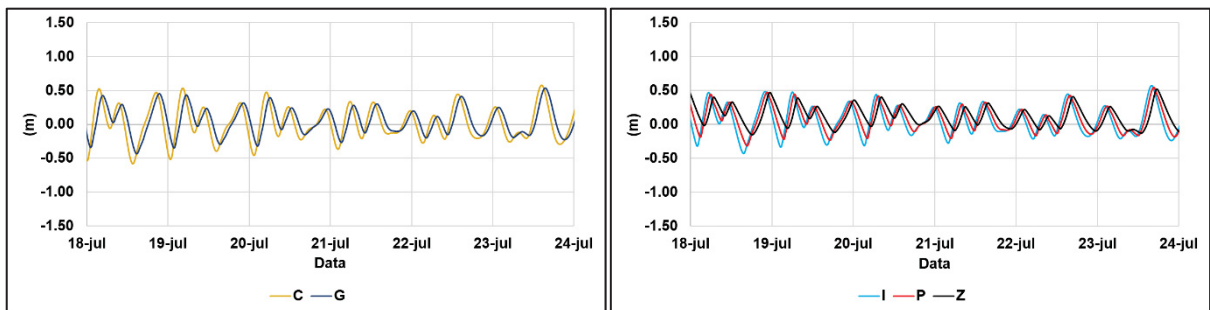


Figura 46 - Elevação da superfície livre para as estações de monitoramento da modelagem hidrodinâmica do rio Guaraguaçu no período de quadratura no cenário seco (Fonte: Autor).

No período de sizígia, no cenário chuvoso (Figura 47), entre os dias 06/02/2020 e 13/02/2020 observa-se o mesmo comportamento do período seco, com o amortecimento da onda de maré na direção mais interna do estuário. No entanto é possível observar um expressivo aumento do nível médio, principalmente na região do Caxetal (Estação Z) entre os dias 07/02/2020 e 10/02/2020, quando ocorreram as maiores vazões (Figura 38). Nas Estações P e I há uma perceptível influência da vazão nos valores da elevação da superfície livre; o mesmo não ocorre nas Estações C e G, na região próxima à embocadura. É possível observar ainda um

maior amortecimento da onda de maré nas estações mais internas do estuário, certamente provocado pelo aumento da perda de carga nesta região.

Na quadratura, para o mesmo cenário chuvoso (Figura 48), entre os dias 14/02/2020 e 20/02/2020, as vazões não foram significativas quando comparadas ao período de sizígia. Sendo assim, não foi observado aumento significativo no nível médio na estação Z. No entanto, na região do Caxetal a onda de maré é significativamente amortecida.

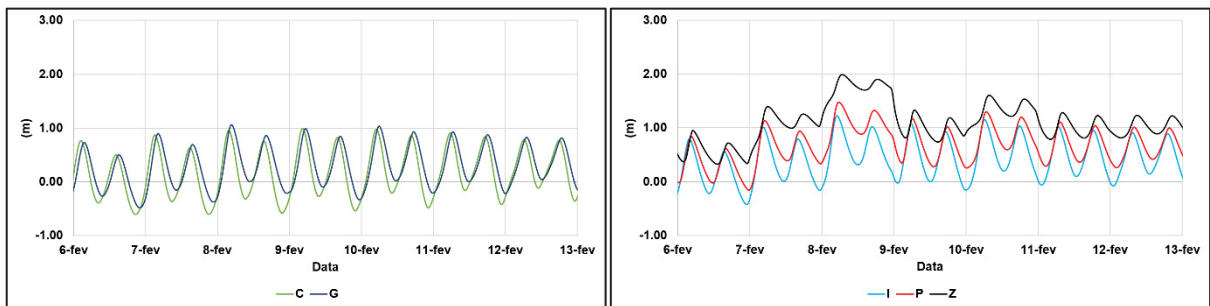


Figura 47 - Elevação da superfície livre para as estações de monitoramento da modelagem hidrodinâmica do rio Guaraguaçu no período de sizígia no cenário chuvoso (Fonte: Autor).

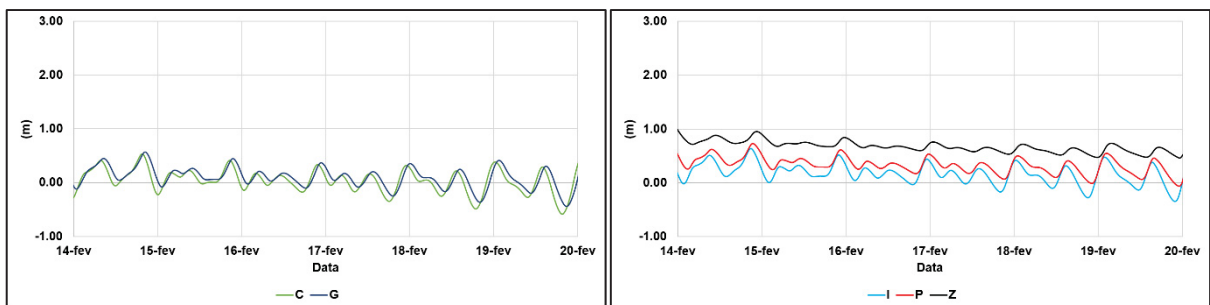


Figura 48 - Elevação da superfície livre para as estações de monitoramento da modelagem hidrodinâmica do rio Guaraguaçu no período de quadratura no cenário chuvoso (Fonte: Autor).

A Figura 49 apresenta a elevação da superfície livre para as duas estações mais distantes entre si, as estações A e Z, localizadas na embocadura do rio e no Caxetal, respectivamente. Os resultados, entre os dias 10/07/2022 e 16/07/2022, confirmam que a onda de maré sofre um amortecimento à medida que entram para o interior do estuário, e ainda, ocorre um atraso na onda de maré, com uma diferença de fase entre as estações Estação A e Estação Z de aproximadamente 3,0 horas nos picos de preamar.

A Figura 50 mostra as linhas d'água ao longo do rio Guaraguaçu, em três momentos: baixamar, meia maré enchente e preamar na estação A, localizada na embocadura. As declividades da linha d'água no rio Guaraguaçu, para os instantes de baixamar e preamar na estação A, são $-0,034$ m/Km e $0,027$ m/Km, respectivamente. O sinal negativo indica vazante e

o sinal positivo, enchente. Claramente a vazante deve apresentar as maiores velocidades. Observa-se uma inversão da declividade da linha d'água na seção distante 15,0 Km do Caxetal, no instante de meia maré enchente na estação A, indicando possivelmente um ponto de velocidade nula.

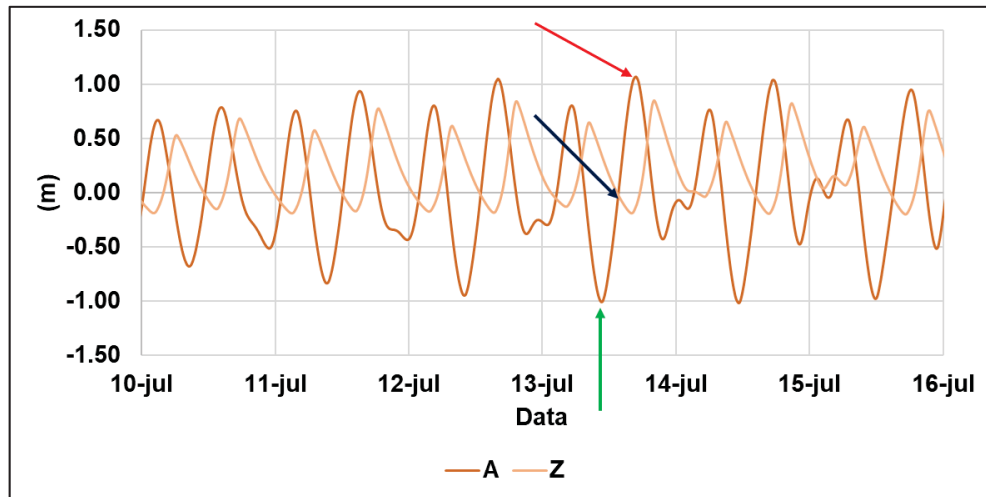


Figura 49 - Série temporal da elevação da superfície livre para as estações A e Z, indicando diferentes momentos, baixa-mar (verde), meia maré de enchente (azul) e preamar (vermelho) no cenário seco (Fonte: Autor).

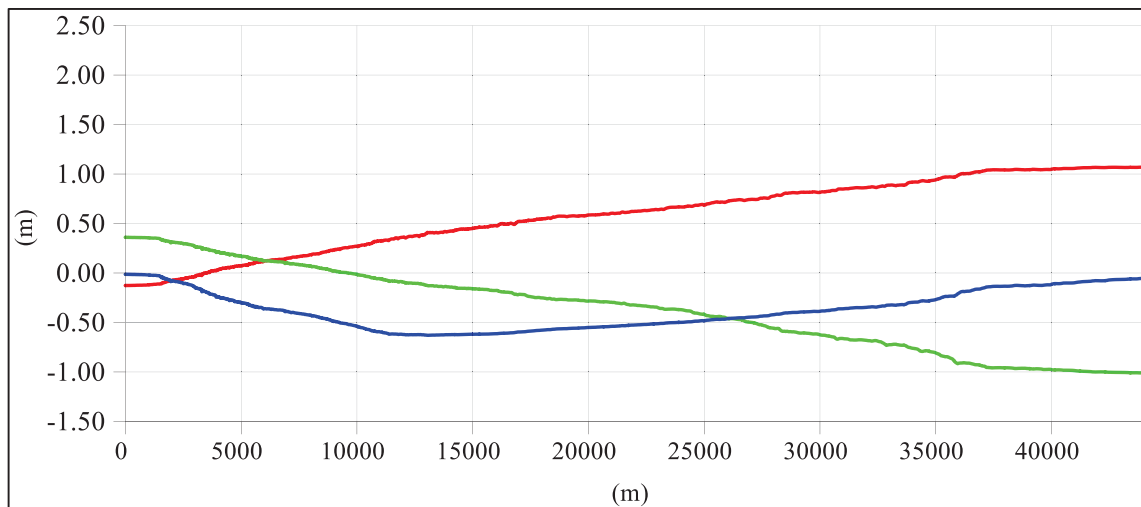


Figura 50 - Perfil longitudinal da linha d'água em instantes de baixamar (verde), meia maré de enchente (azul) e preamar (vermelho) no cenário seco.. (Fonte: Autor).

A Figura 51 apresenta a elevação da superfície livre para as estações A e Z, entre os dias 06/02/2020 e 13/02/2020. Entre os dias 08/02/2020 e 09/02/2020 os valores da elevação da superfície livre na estação Z tiveram uma elevação significativa. Observa-se ainda que a onda de maré sofre um expressivo amortecimento à medida que entram para o interior do estuário, com uma diferença de fase entre as estações A e Z de aproximadamente 3,0 horas.

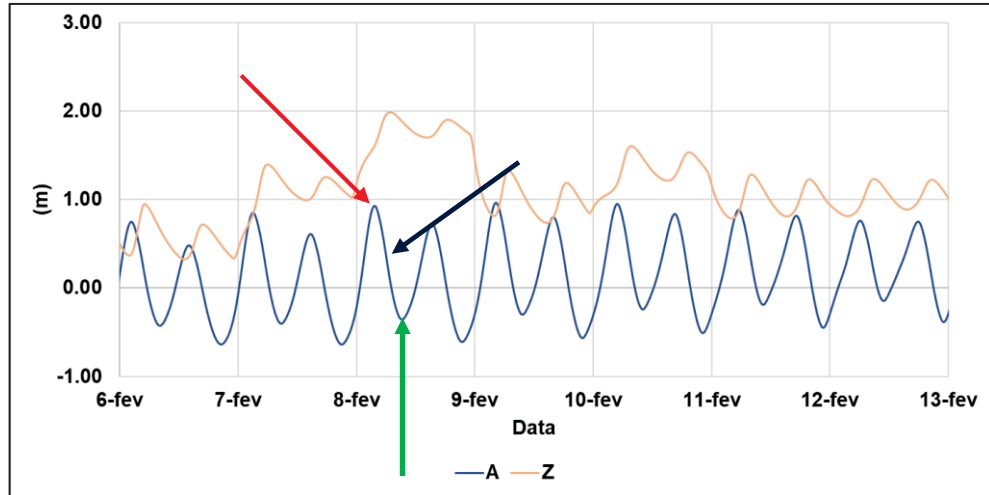


Figura 51 - Série temporal da elevação da superfície livre para as estações A e Z, indicando diferentes momentos, baixamar (verde), maré de enchente (azul) e preamar (vermelho) no cenário chuvoso (Fonte: Autor).

A Figura 52 apresenta as linhas d'água ao longo do rio Guaraguaçu, em três momentos distintos: baixa-mar, meia maré enchente e preamar na estação A. Diferentemente do comportamento do período seco, as declividades para os três instantes são negativas: $-0,015$ m/Km, $-0,037$ m/Km, e $-0,052$ m/Km, para os instantes de preamar, meia maré enchente e baixa-mar, respectivamente, indicando uma única tendência de vazante. As maiores velocidades ocorrem no instante de baixa-mar, com maior gradiente hidráulico. No instante de preamar, a partir da seção distante 10,0 Km do Caxeta, a linha d'água apresenta declividade quase nula, o que certamente indica velocidades muito baixas na região.

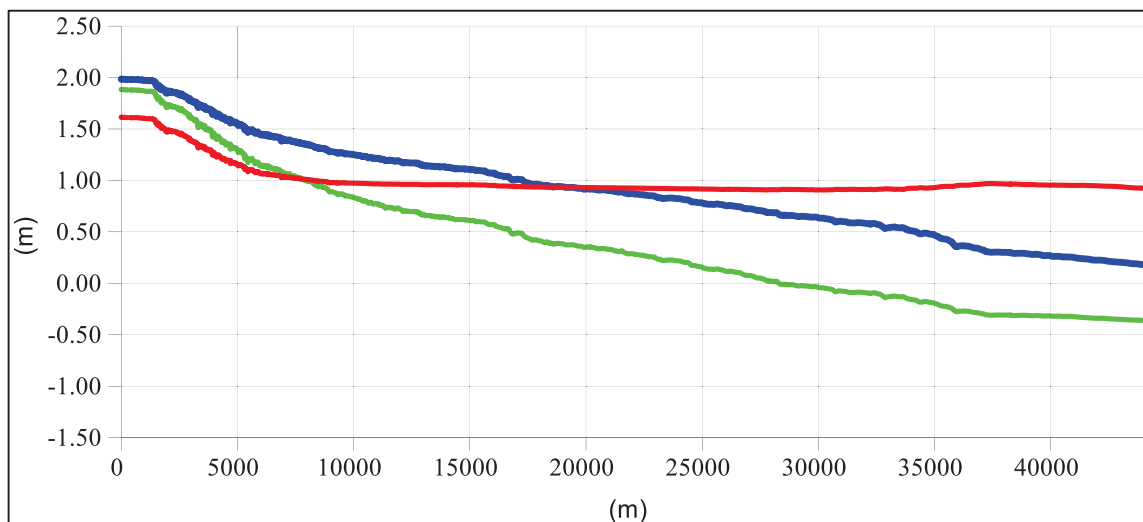


Figura 52 – Perfil longitudinal para baixamar (verde), meia maré de enchente (azul) e preamar (vermelho) no cenário seco (Fonte: Autor).

As vazões foram calculadas nas seções transversais correspondentes às estações de monitoramento da elevação da superfície livre. Adotaremos a nomenclatura das estações para as seções transversais. Utiliza-se a convenção normalmente usada para estuários: vazões positivas indicam fluxo na direção de saída (vazante) e vazões negativas indicam fluxo de entrada (enchente).

A Figura 53 exibe dados de vazão nas seções transversais ao longo do período de sizígia, ocorrido entre os dias 10/07/2022 e 16/07/2022. É observado que a estação C demonstra maiores valores de vazão durante a vazante, embora a tendência predominante seja de enchente.

Nas demais seções, observou-se um padrão de vazante com redução significativa nos valores de vazão. As menores amplitudes de vazão foram registradas na seção Z, com o menor valor de 2,55 m³/s e o maior valor de 9,34 m³/s. O aumento das vazões na estação I se deve ao fato dela estar localizada após a confluência entre os rios Guaraguaçu, Cambará e Pery.

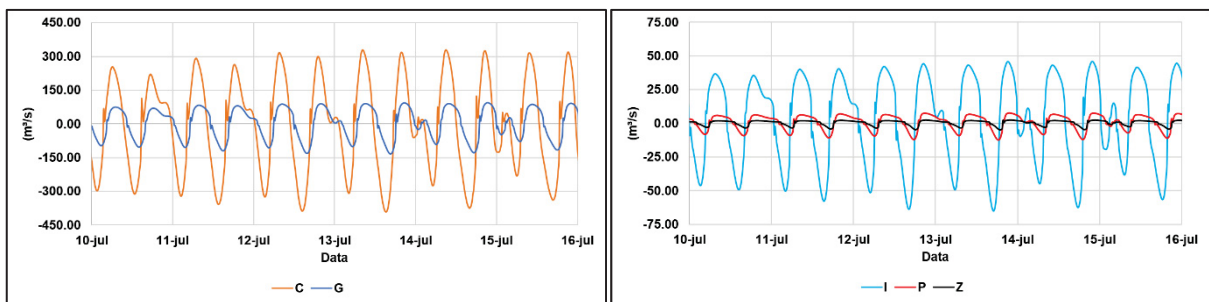


Figura 53 – Valores de vazão no período de sizígia nas seções transversais correspondentes as estações de monitoramento no período seco (Fonte: Autor).

A Figura 54 apresenta as vazões durante o período de quadratura. Observa-se um padrão semelhante ao período de sizígia, onde a estação C registra as vazões mais elevadas, embora com amplitudes menores em comparação ao período anterior. Observa-se também uma predominância de vazante ao longo do período, com duração maior que o de enchente.

Durante o período em questão, as seções I, P e Z também tiveram um padrão de vazante. Os valores mais baixos foram registrados na seção Z, variando de um mínimo de -0,20 m³/s a um máximo de 6,27 m³/s. É importante destacar que as flutuações na elevação da superfície livre tiveram uma influência relativamente menor nas seções P e Z durante este período, enquanto na estação I, observou-se uma influência mais significativa nos valores de vazão.

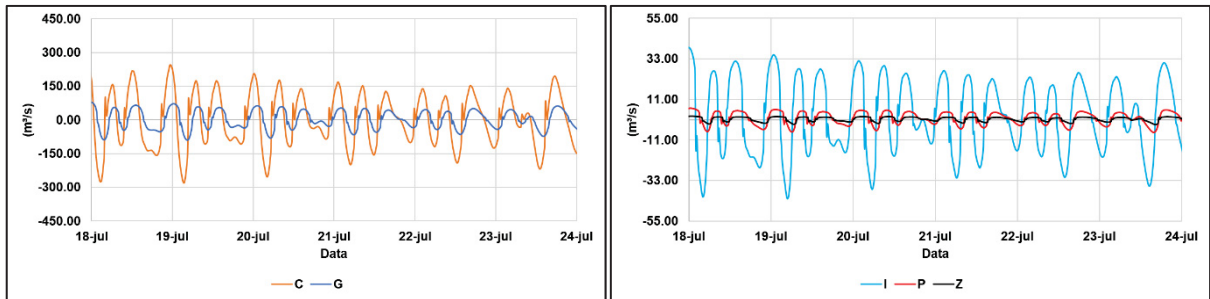


Figura 54 - Série temporal para os valores de vazão no período de quadratura nas seções transversais próximas as estações de monitoramento no período seco (Fonte: Autor).

Os valores das vazões calculados nas seções no período de sizígia do cenário chuvoso são apresentados na Figura 55. A seção C apresenta amplitudes de vazão mais significativas durante as fases de baixa-mar e preamar, caracterizando-se por um comportamento predominantemente decrescente ao longo do período. A seção G apresenta oscilações menores em comparação à estação C, com defasagem nos picos de preamar de 1h15min.

A análise da seção transversal I revela um padrão dominante de vazante. No dia 07/02/2022, houve um aumento significativo nos valores de vazão, atingindo 105,60 m³/s no dia 08/02/2020. Durante o período de 7/02/2020 a 09/07/2020, a maioria dos valores de vazão permaneceu positiva, o que pode ser atribuído ao aumento das vazões ocorridos nesse intervalo de tempo. No entanto, após o dia 09/02/2020, observamos valores negativos das vazões, embora essa condição tenha sido de curta duração.

Nas estações P e Z, as oscilações em função da maré mostraram-se amortecidas, e o comportamento predominante ao longo desse período foi de vazante. Na seção Z, especificamente, os valores de vazão variaram entre 40 m³/s e -2,35 m³/s durante esse intervalo de tempo

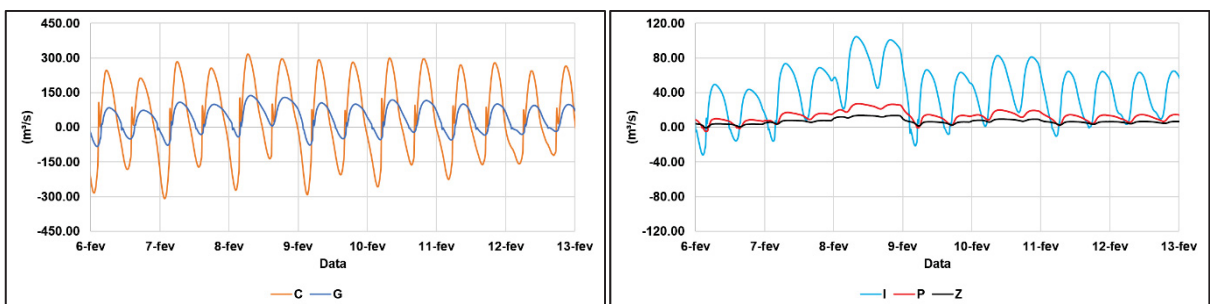


Figura 55 - Série temporal para os valores de vazão no período de sizígia nas seções transversais próximas as estações de monitoramento no período chuvoso (Fonte: Autor).

A Figura 56 exibe amplitudes mais baixas das vazões durante o período de quadratura no cenário chuvoso. Nas duas seções mais internas do rio Cambará, P e Z, observamos valores exclusivamente positivos durante toda a análise. A seção Z, em particular, apresenta estabilidade, mantendo-se dentro da faixa de 6,84 m³/s a 18,03 m³/s ao longo do período

modelado. A seção P segue um padrão semelhante, embora com variações mais acentuadas na vazão, variando de 9,87 m³/s a 48,14 m³/s.

A seção C apresenta as maiores amplitudes durante o período de quadratura no cenário chuvoso, com valores variando de -216,01 m³/s a 209,33 m³/s. Como na sizígia o comportamento predominante foi de vazante no período analisado.

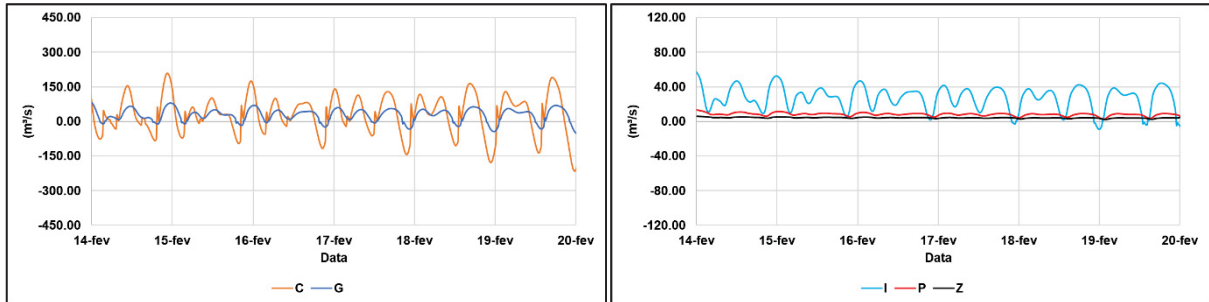


Figura 56 - Série temporal para os valores de vazão no período de quadratura nas seções transversais próximas as estações de monitoramento no período chuvoso (Fonte: Autor).

4.3 ESCOAMENTO RESIDUAL

As velocidades residuais foram calculadas nos dois cenários hidrodinâmicos partindo de instante de baixa-mar. Foi considerado um período de 48 horas, possibilitando incluir quatro ciclos de maré completos no cálculo do escoamento residual. A Figura 57 apresenta as regiões selecionadas onde os resultados são apresentados. A Figura 58 mostra a série temporal do período de sizígia e quadratura e o intervalo em que o escoamento residual foi calculado.

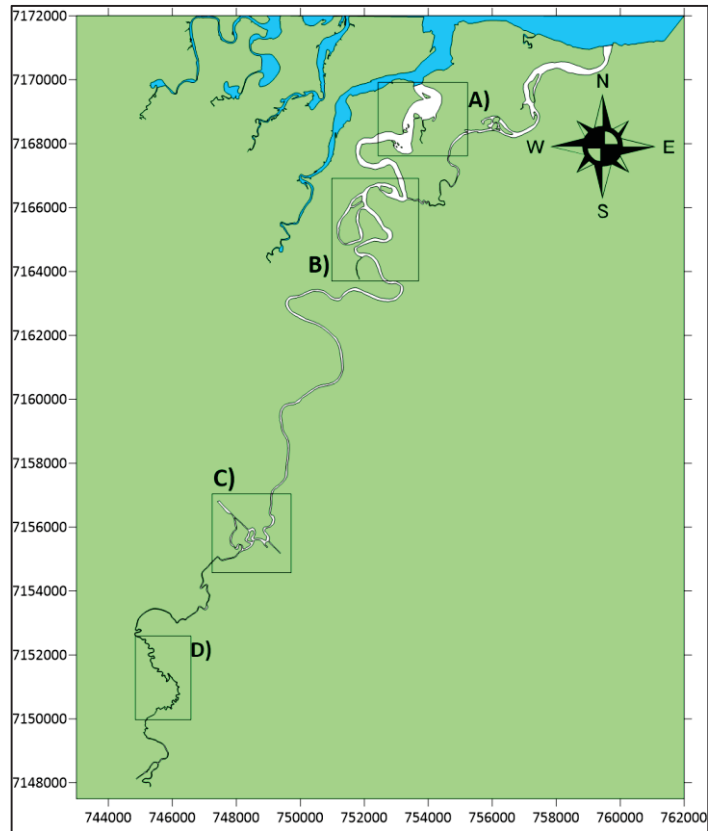


Figura 57 – Localização das regiões para apresentação do escoamento residual e do campo de correntes (Fonte: Autor).

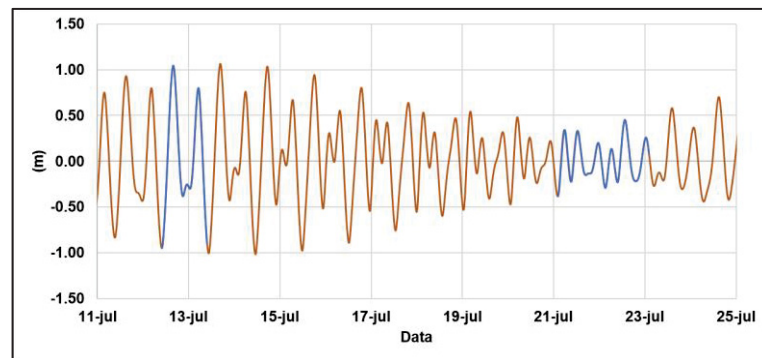


Figura 58 – Série de elevação da superfície livre com destaque para os intervalos em que o escoamento residual foi calculado para o cenário seco (Fonte: Autor).

Os campos de correntes³ residuais para o período de sizígia são mostrados nas Figura 59 a Figura 62 para as regiões de interesses. Na região da embocadura, as maiores velocidades são próximas a embocadura na região Leste, com valores de 0,03 m/s. Na região interna, têm-se a formação de dois vórtices mostrando um comportamento de enchente, mas com valores de velocidade residuais muito baixos.

³ Os vetores do campo de correntes estão com valores fixos para melhor representação da direção e do sentido das correntes residuais, portanto o módulo da velocidade residual deverá ser observado pelas isolinhas indicadas nas figuras.

Na região mais interna do estuário, mostrada na Figura 60, é possível observar a inversão do sentido da corrente residual da tendência de enchente na embocadura para a tendência de vazante.

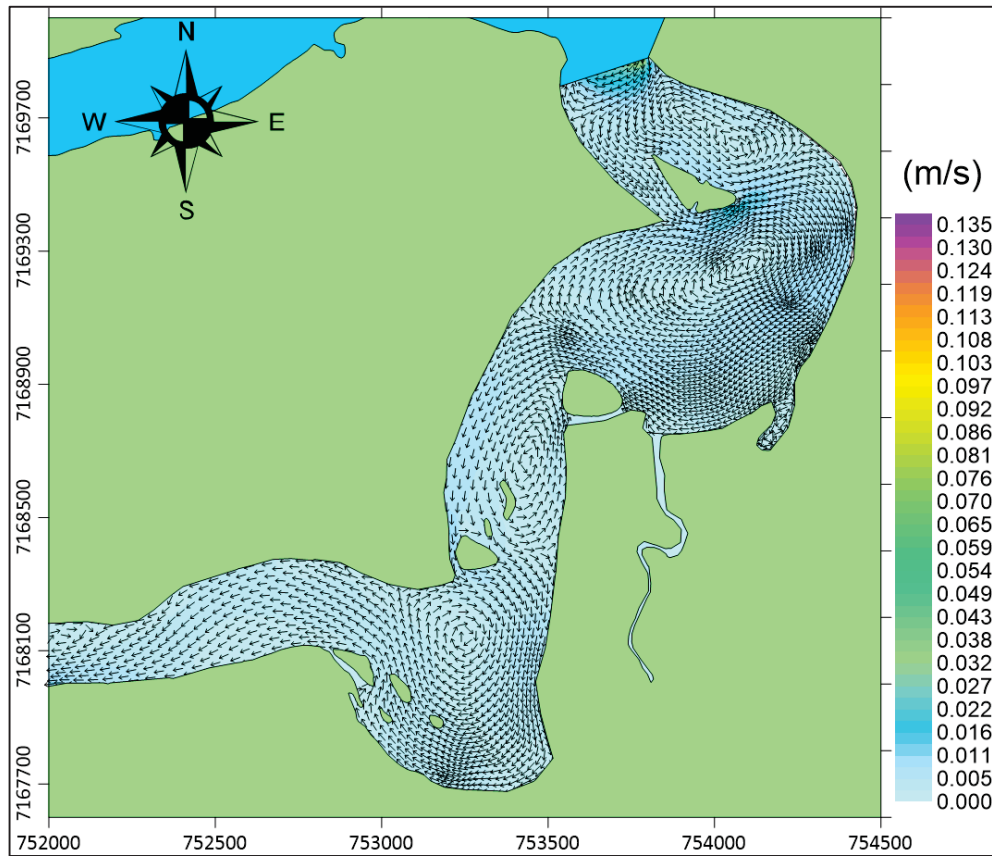


Figura 59 – Campo de correntes residuais, em m/s, na região A para o período de sizígia, considerando 48 horas a partir do dia 12/07/2022, no cenário seco (Fonte: Autor).

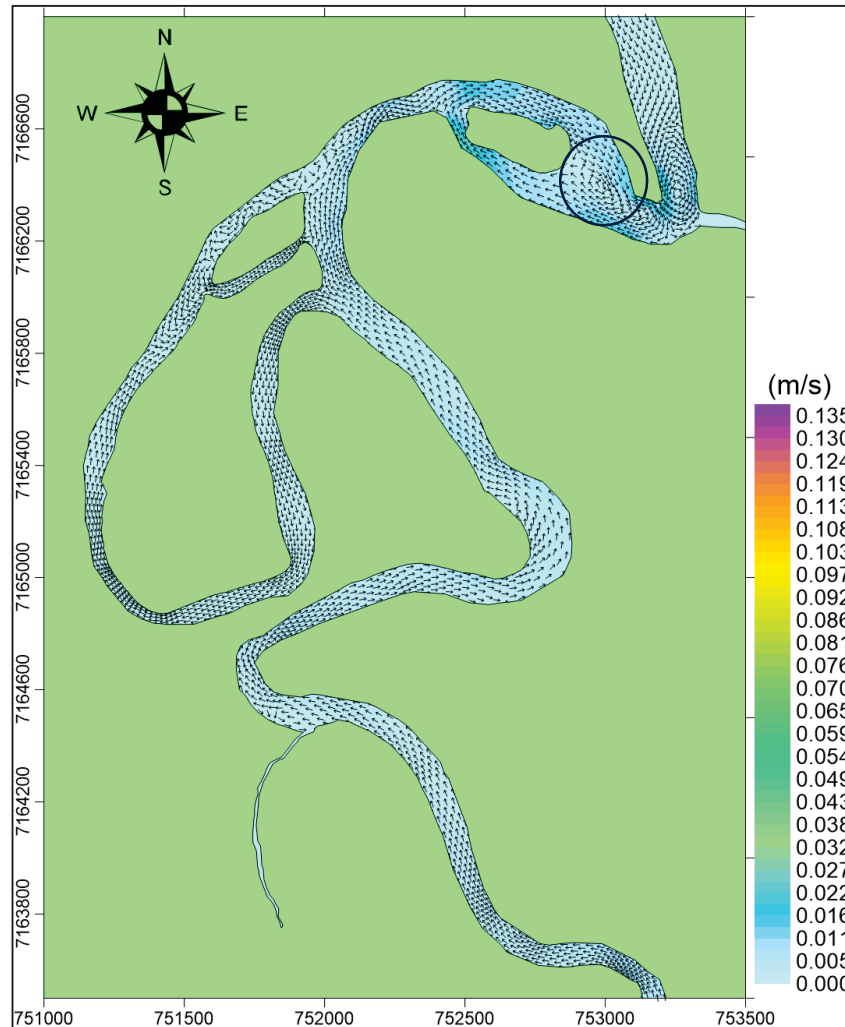


Figura 60 – Campo de correntes residuais, em m/s, na região B para o período de sizígia, considerando 48 horas a partir do dia 12/07/2022, em destaque o ponto de inversão da corrente, no cenário seco (Fonte: Autor).

Na confluência entre os rios Cambará, Guaraguaçu e Pery, as correntes residuais (Figura 61) apresentam as maiores velocidades, com valores próximos de 0,02 m/s. A região não apresenta a formação de vórtices, já que os canais são estreitos, permitindo assim o fluxo em um único sentido. Observa-se claramente uma tendência de vazante e, por apresentar valores muito baixos no canal de ligação dos rios Guaraguaçu e Cambará, é possível afirmar que esta região é propensa a presenças de braquiárias.

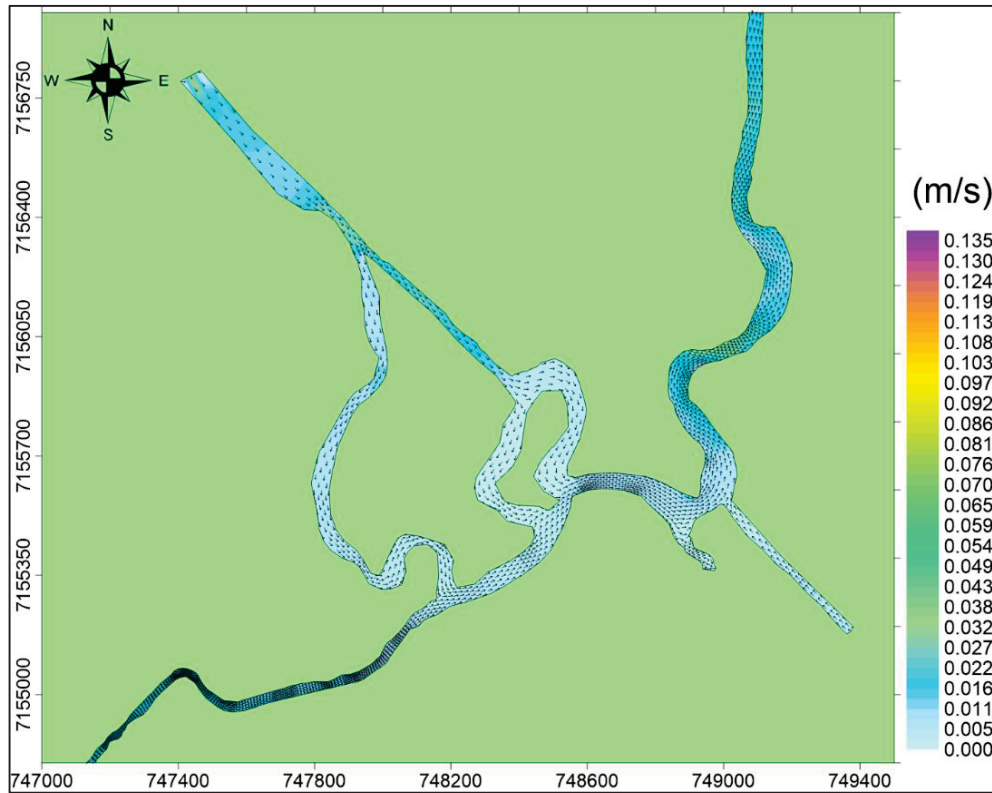


Figura 61 – Campo de correntes residuais, em m/s, na região C para o período de sizígia, considerando 48 horas a partir do dia 12/07/2022, no cenário seco (Fonte: Autor).

A Figura 62 mostra a porção mais sinuosa do rio Cambará. As maiores velocidades são de 0,13 m/s na porção mais ao sul da região selecionada, tendo o sentido unicamente de vazante. Em alguns pontos nessa região, principalmente nas curvas do rio, é possível observar gradientes transversais de velocidade, indicando assim uma possível zona de estagnação

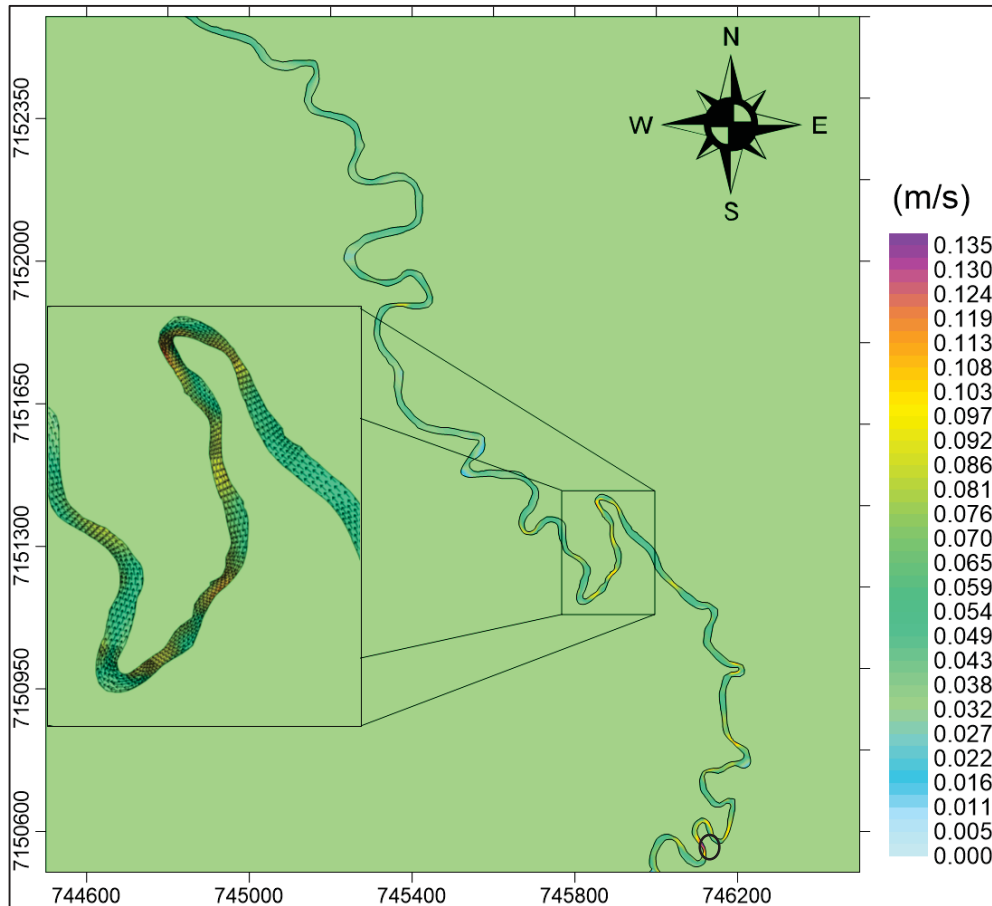


Figura 62 – Campo de correntes residuais, em m/s, na região D para o período de sizígia, considerando 48 horas a partir do dia 12/07/2022, no cenário seco (Fonte: Autor).

Para o período de quadratura na região da embocadura (Figura 63) o campo de correntes residual tem sentido de enchente para o período calculado, com velocidades menores que 0,003 m/s não contendo regiões de recirculação. Para a região mais interna no período de quadratura para o cenário seco (Figura 64) os valores do módulo da velocidade do campo residual tiveram mesmo comportamento em relação ao período de sizígia, com valores baixos, próximos de 0.01 m/s. A inversão de corrente do campo residual para esse período selecionado da quadratura no cenário seco não foi observada nesta região, contudo a inversão de corrente ocorre a aproximadamente 18 km da embocadura do rio Guarguaçu.

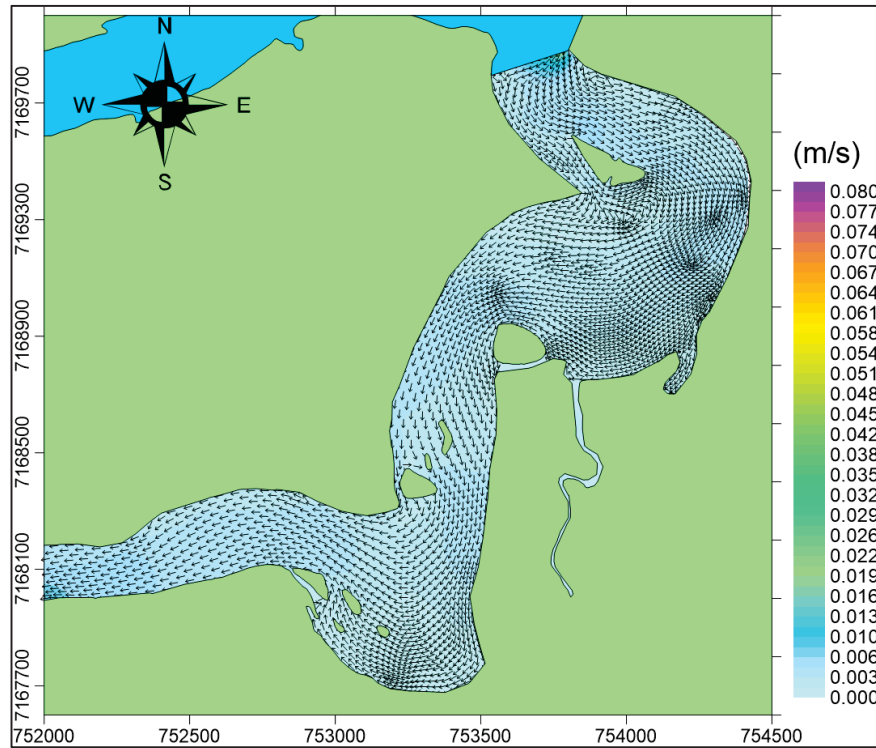


Figura 63 – Campo de correntes residuais, em m/s, na região A para o período de sizígia, considerando 48 horas a partir do dia 14/07/2022 , no cenário seco (Fonte: Autor).

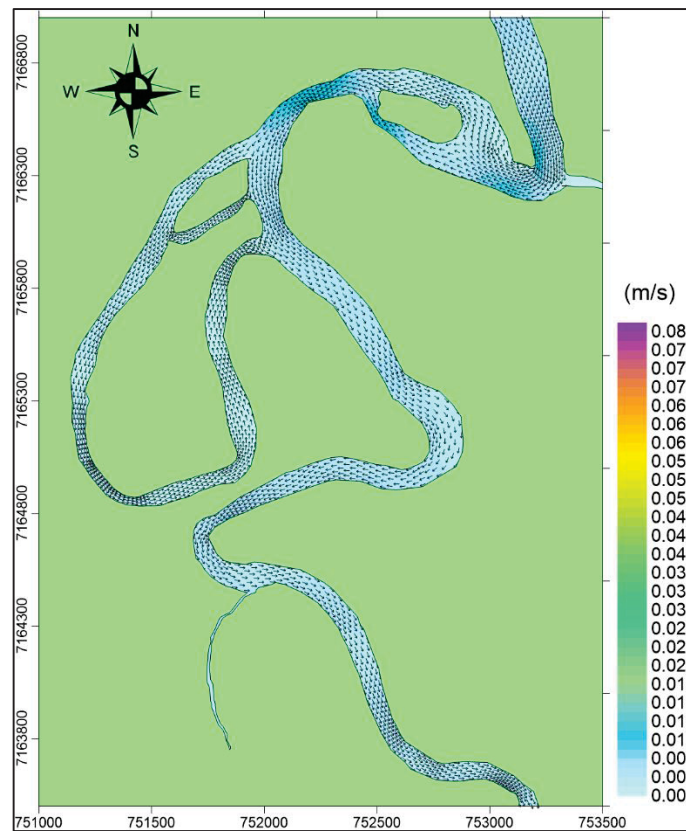


Figura 64 – Campo de correntes residuais, em m/s, na região B para o período de sizígia, considerando 48 horas a partir do dia 14/07/2022 , no cenário seco (Fonte: Autor).

Na Figura 65 é mostrado o campo de corrente residual para a região da confluência dos rios, na quadratura do cenário seco. As maiores velocidades são no canal de ligação nas confluências do rio Guarguaçu com os rios Cambará e Pery (0.014m/s). Essa região apresenta comportamento de vazante não contendo região com vórtices.

A região mais interna (Figura 66) dispõe dos maiores valores de velocidade residual para o período selecionado da quadratura no período seco, chegando a de 0,08 m/s nas menores seções transversais do rio Cambará. O campo de corrente residual apresenta comportamento de vazante não mostrando regiões de recirculação na região, mas mostra uma variação na direção transversal.

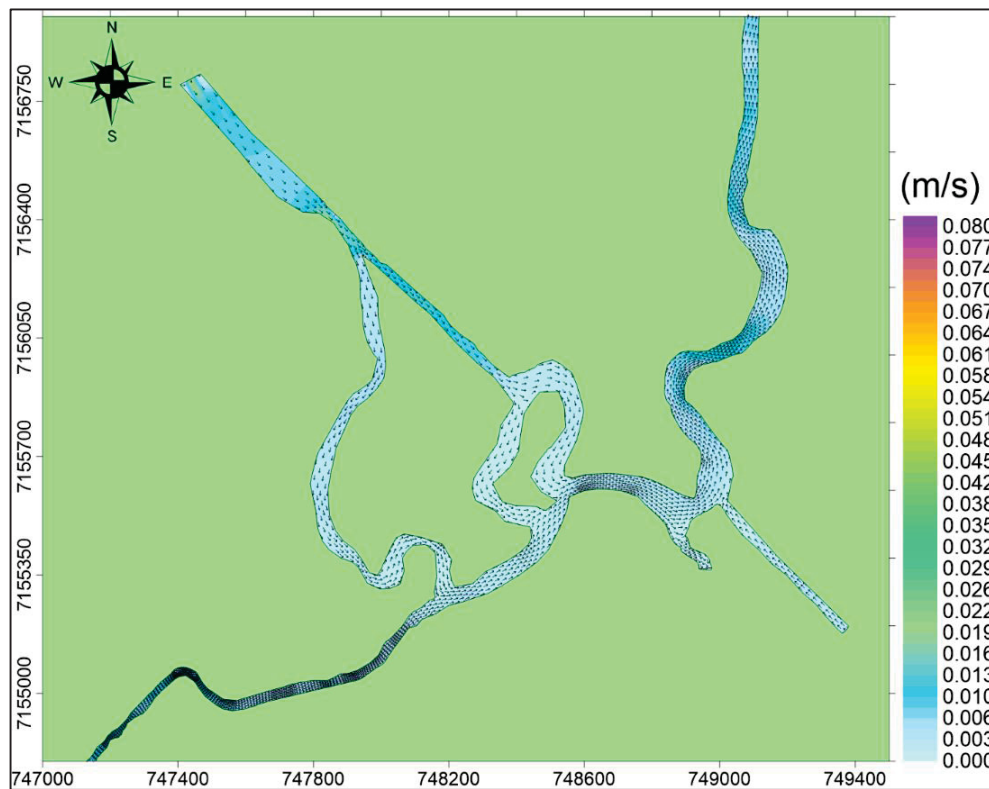


Figura 65 – Campo de correntes residuais, em m/s, na região C para o período de sizígia, considerando 48 horas a partir do dia 14/07/2022, no cenário seco (Fonte: Autor).

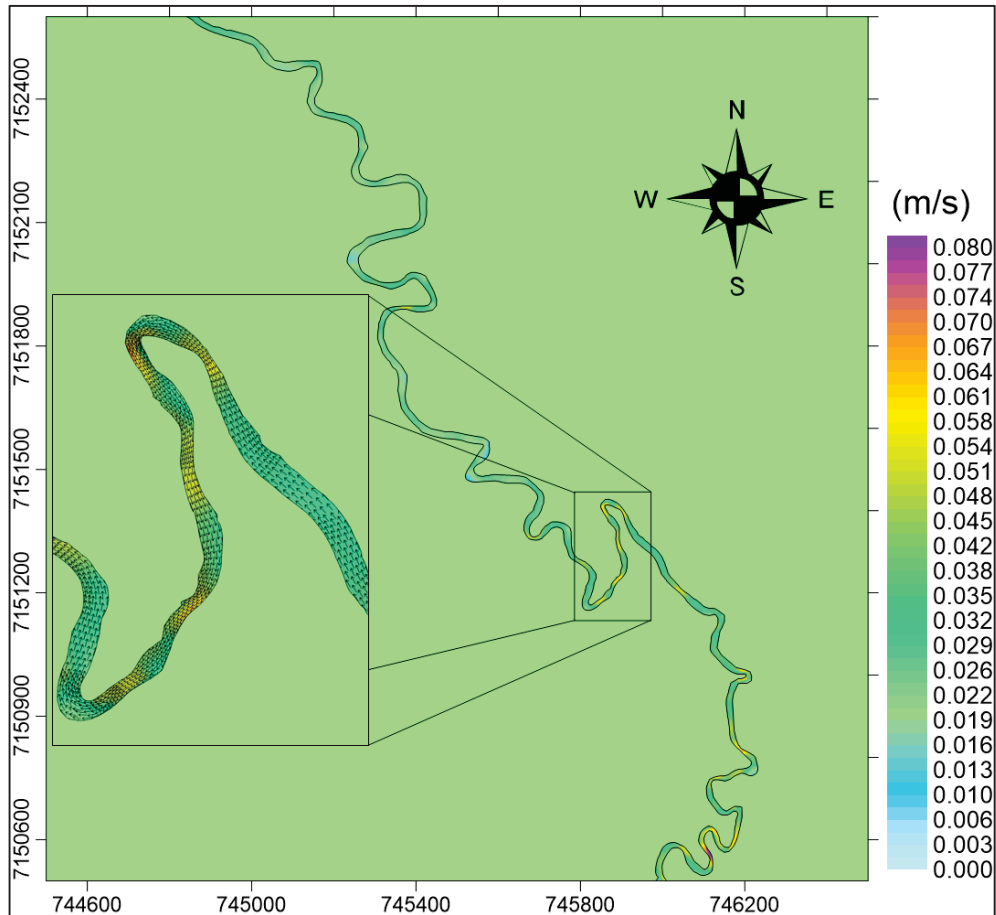


Figura 66 – Campo de correntes residuais, em m/s, na região D para o período de sizígia, considerando 48 horas a partir do dia 14/07/2022 no cenário seco (Fonte: Autor).

A maré no período selecionado para o cálculo do escoamento residual do cenário chuvoso nos períodos de sizígia e quadratura é apresentada na Figura 67.

O campo de corrente residual no cenário chuvoso não apresentou comportamento de enchente na região da embocadura para o período de sizígia (Figura 68). Também não houve a presença de vórtices para o período indicando. Os maiores valores de velocidade são referentes à porção mais ao sul chegando a 0,04 m/s.

A Figura 69 mostra o campo de corrente para o período de sizígia na região mais interna do estuário. Os maiores valores da velocidade são de 0,2 m/s, quase 100 vezes maior que as velocidades calculadas para o cenário seco na sizígia, indicando a presença da influência da vazão na região mais próxima à embocadura.

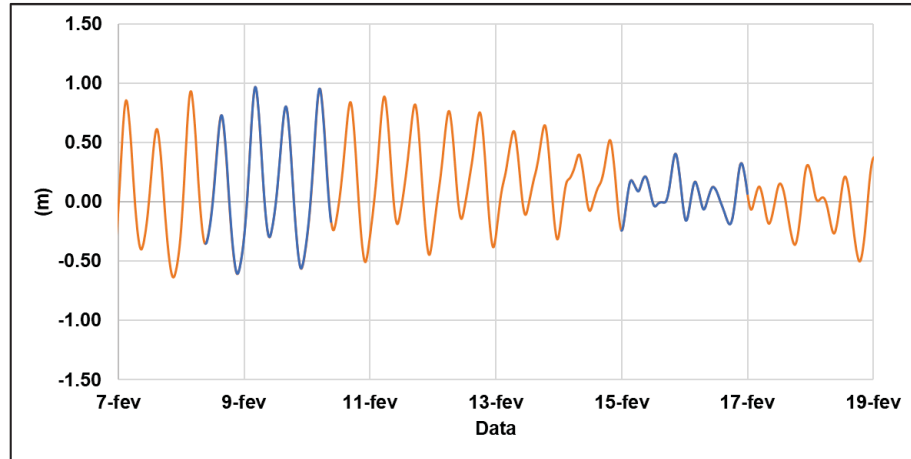


Figura 67 – Série de elevação da superfície livre com destaque para os intervalos em que o escoamento residual foi calculado para o cenário chuvoso (Fonte: Autor).

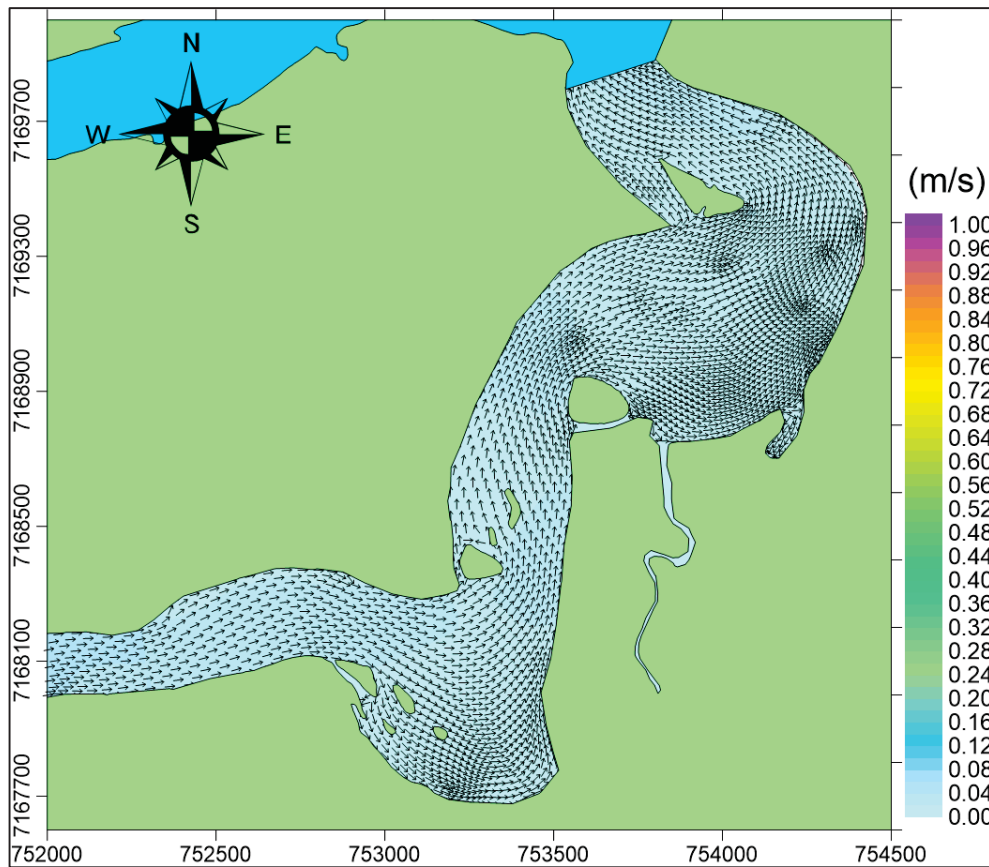


Figura 68 – Campo de correntes residuais, em m/s, na região A para o período de sizígia, considerando 48 horas a partir do dia 08/02/2020 no cenário chuvoso (Fonte: Autor).

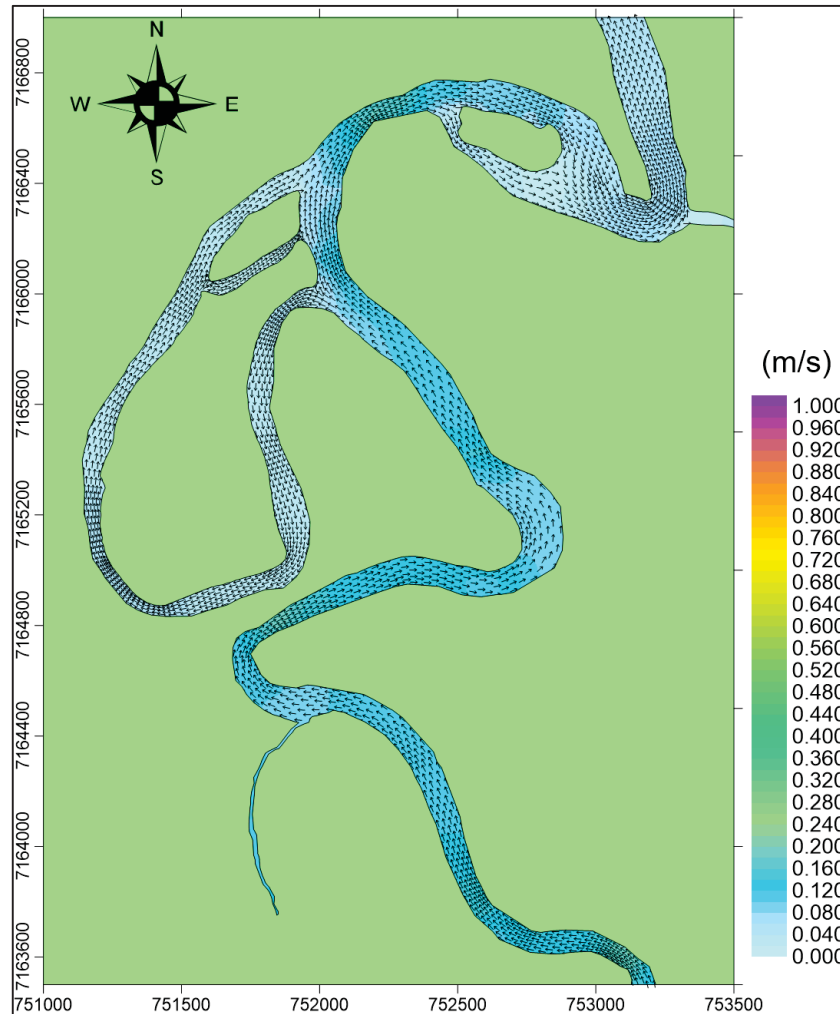


Figura 69 – Campo de correntes residuais, em m/s, na região B para o período de sizígia, considerando 48 horas a partir do dia 08/02/2020 no cenário chuvoso (Fonte: Autor).

A Figura 70 mostra o campo de corrente residual, para a região de confluência dos rios no período de sizígia. Os maiores valores do módulo da velocidade do escoamento residual estão localizados após a confluência entre os rios Cambará, Guaraguaçu e Pery, com valores de aproximadamente 0,45 m/s nas duas regiões. O comportamento de vazante ocorre em toda a extensão, sem a presença de vórtices.

A região mais interna do rio Cambará, mostrada na pela Figura 71, apresenta os maiores valores a corrente residual. As velocidades são na ordem de 1,0 m/s na porção mais ao sul da figura, sendo cerca de 10 vezes maiores que no período de sizígia do cenário seco. Como nos resultados anteriores, o comportamento é de vazante para o período selecionado.

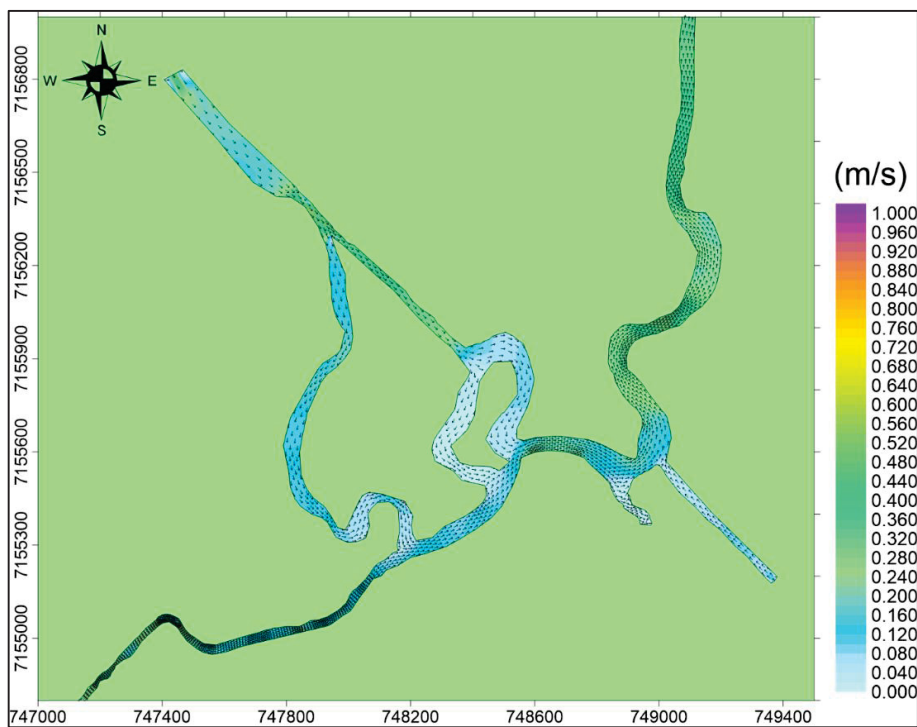


Figura 70 – Campo de correntes residuais, em m/s, na região C para o período de sizígia, considerando 48 horas a partir do dia 08/02/2020 no cenário chuvoso (Fonte: Autor).

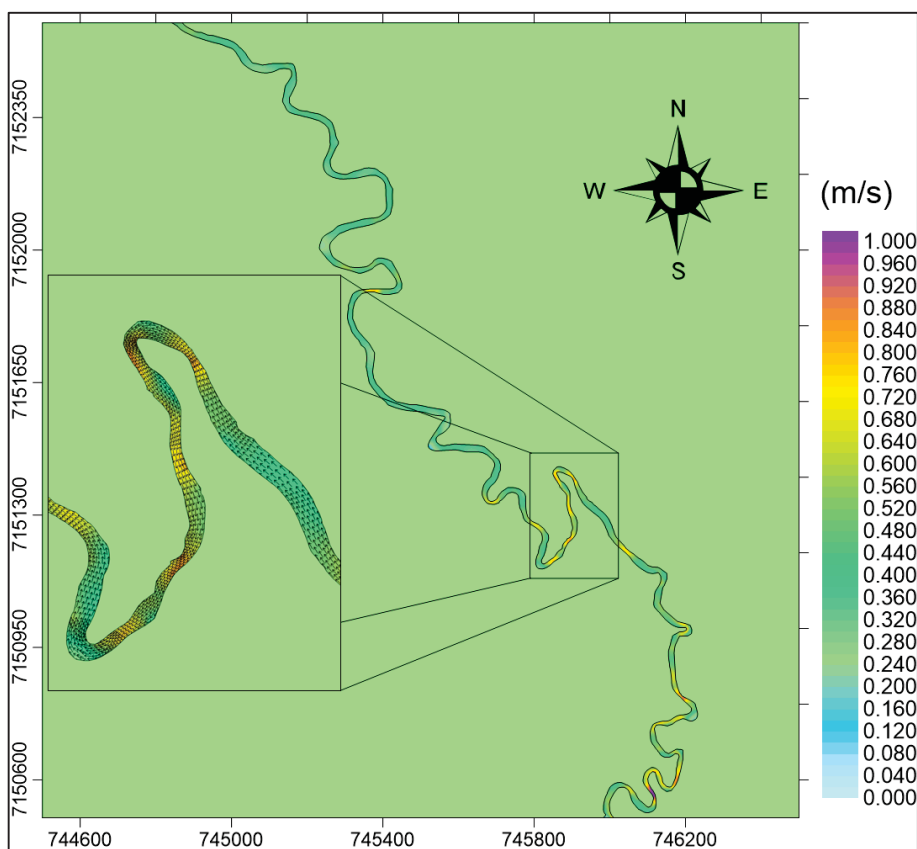


Figura 71 – Campo de correntes residuais, em m/s, na região D para o período de sizígia, considerando 48 horas a partir do dia 08/02/2020 no cenário chuvoso (Fonte: Autor).

As Figura 72 a Figura 75 apresentam as isolinhas do campo de correntes residuais para o período de quadratura do cenário chuvoso das regiões da embocadura e da parte mais interna do estuário, mostrando um comportamento de vazante em toda a extensão do rio. As velocidades máximas chegam a valores de 0,1 m/s, não apresentando regiões de recirculação.

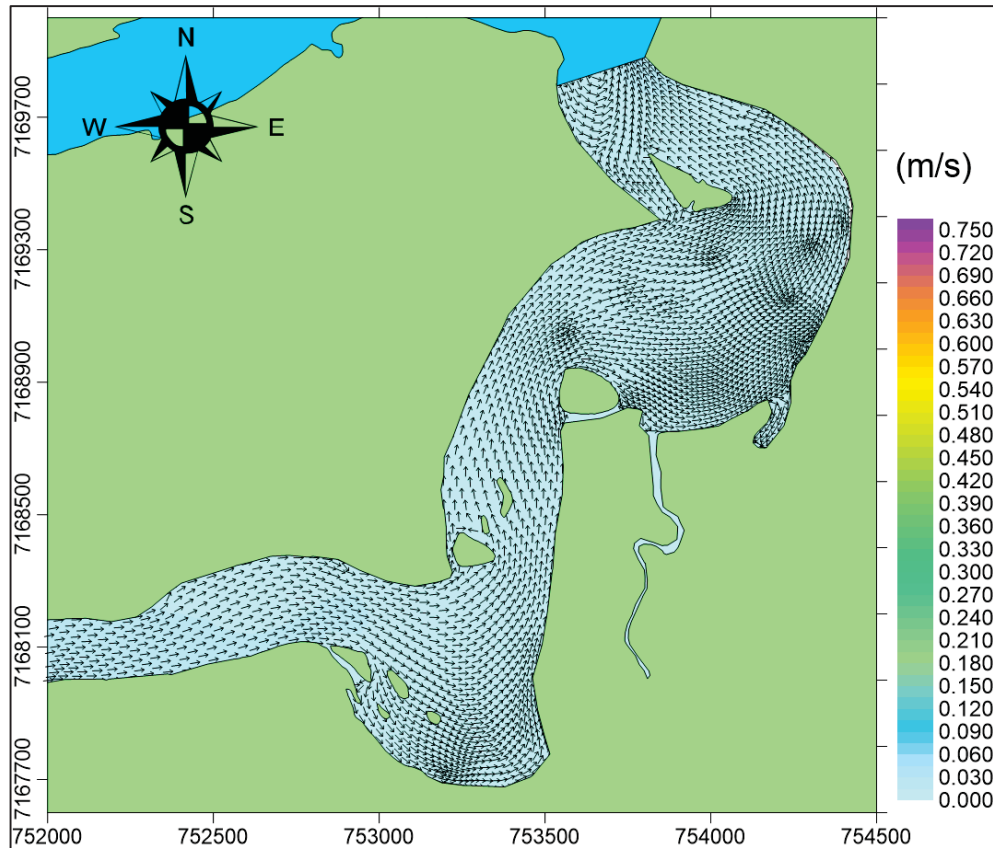


Figura 72 – Campo de correntes residuais, em m/s, na região A para o período de sizígia, considerando 48 horas a partir do dia 15/02/2020 no cenário chuvoso (Fonte: Autor).

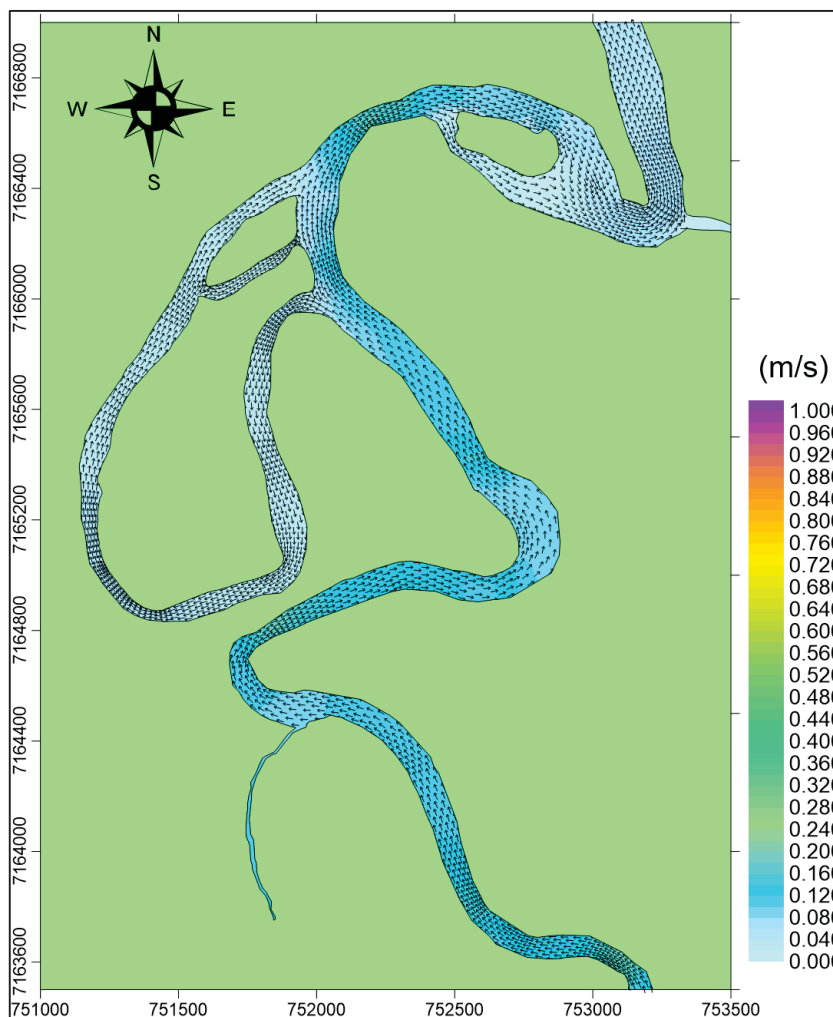


Figura 73 – Campo de correntes residuais, em m/s, na região B para o período de sizígia, considerando 48 horas a partir do dia 15/02/2020 no cenário chuvoso (Fonte: Autor).

No período de sizígia, a região da confluência entre os rios mostra semelhanças com as áreas de maior velocidade observadas durante o período seco. No entanto, é importante notar que as maiores velocidades durante a sizígia são aproximadamente 20 vezes maiores, atingindo aproximadamente 0,3 m/s. Por outro lado, as velocidades mais baixas ainda são encontradas na região com a maior cota de fundo, onde há uma presença significativa de braquiárias no rio Guaraguaçu.

A porção mais sinuosa, representada pela região D (Figura 75), apresenta velocidades máximas de 0,75 m/s para o período de quadratura no cenário chuvoso. Essa região, em todas as situações mostradas, foi a que apresentou as maiores velocidades devido às características morfológicas do canal e por ser receptora da vazão fluvial dos 3 rios da região, de acordo com as condições de contorno impostas no modelo hidrodinâmico, sendo os rios Cambará, Indaial e o rio do Meio.

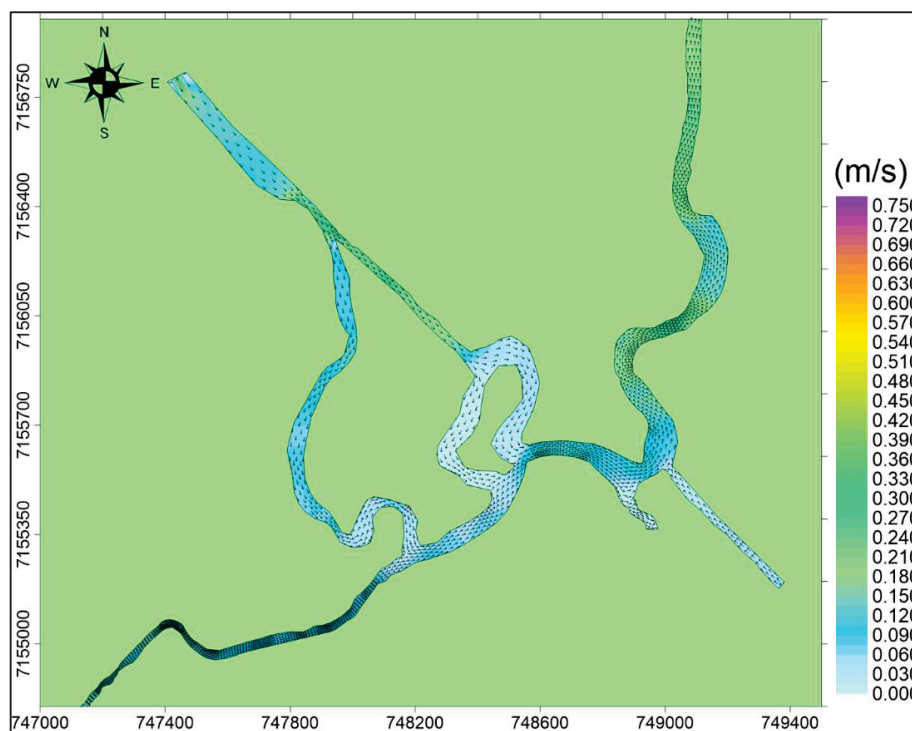


Figura 74 – Campo de correntes residuais, em m/s, na região C para o período de sizígia, considerando 48 horas a partir do dia 15/02/2020 no cenário chuvoso (Fonte: Autor).

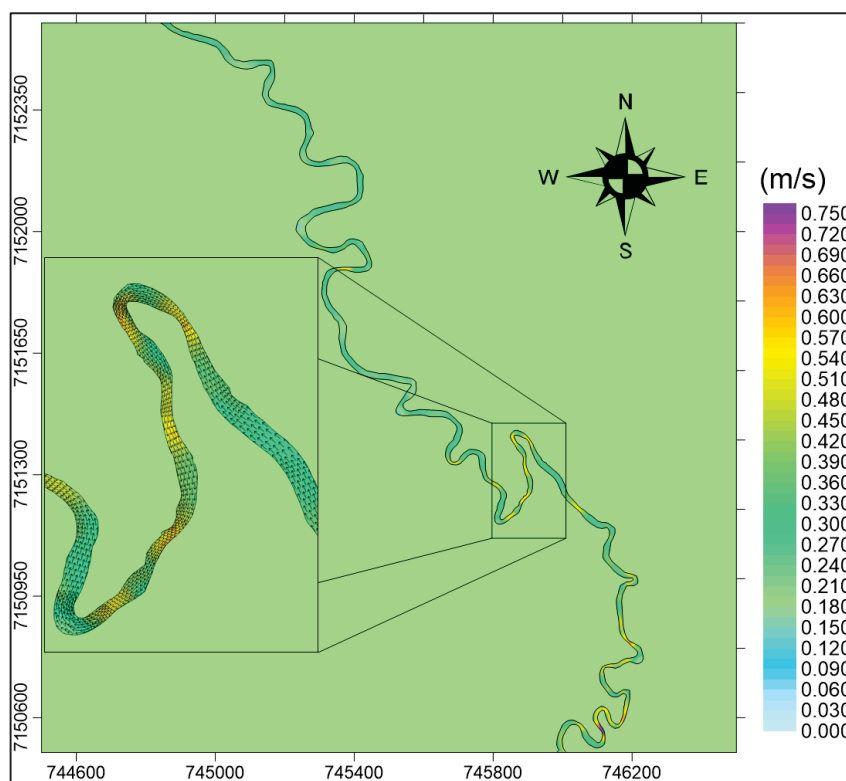


Figura 75 – Campo de correntes residuais, em m/s, na região D para o período de sizígia, considerando 48 horas a partir do dia 15/02/2020 no cenário chuvoso (Fonte: Autor).

Em resumo, comportamento hidrodinâmico dos rios Cambará e Guaraguaçu em momentos de alta pluviosidade e, conseqüentemente, de vazão elevada, para um intervalo de 48 horas, seja no período de sizígia ou de quadratura, demonstra um comportamento de vazante, com velocidades mais elevadas na região D.

No período seco, o sistema revela regiões de recirculação próximas à sua embocadura, sugerindo uma possível zona de estagnação. Além disso, durante o período de quadratura, o sistema exibe um comportamento de enchente próximo à embocadura, e uma zona de inversão no sentido das correntes residuais na região mais interna, quando comparado ao período de sizígia. Tal comportamento mostra que a região estudada sofre influência direta da região externa ao sistema, o Complexo Estuarino de Paranaguá, que pode provocar desequilíbrios tróficos na região, tornando-se sensível a qualquer influência antrópica nas áreas adjacentes ao contorno

4.4 SIMULAÇÃO QUALIDADE DA ÁGUA – SALINIDADE

Os resultados da modelagem do transporte de sal no estuário do rio Guaraguaçu, conforme apresentados nesta seção, revelam capacidade de penetração do sal em partes mais internas do rio Guaraguaçu, demonstrando a influência significativa das variações na vazão no interior do sistema para os diferentes cenários. A condição inicial para os cenários de tempo seco e chuvoso, como representado na Figura 76, foi determinada a partir da modelagem do transporte de sal do CEP.

A Figura 77 apresenta os valores de salinidade para o cenário seco no rio Guaraguaçu nas estações de A a H, que representam as regiões onde variações da salinidade no período simulado podem ser observadas. Na estação H, que está localizada mais distante da embocadura do canal, os valores de salinidade são nulos até o dia 25/07/2022, quando é observado uma entrada de sal pela fronteira aberta; em 30/07/2022, os valores de salinidade aumentam, ultrapassando os limites definidos na Resolução do Conama nº357 para água doce, que é 0,5 ups, tornando-se um ambiente de água salobra durante os instantes de preamar. A região caracterizada pela estação G apresentou o mesmo comportamento da estação H, contudo a mudança para o ambiente de águas salobras aconteceu no dia 12/07/2022, quando a salinidade ultrapassa o limite de 0,5 ups, no instante de preamar. Comportamento semelhante pode ser observado na estação F, com valores maiores que 0,5 ups em praticamente todo o período.

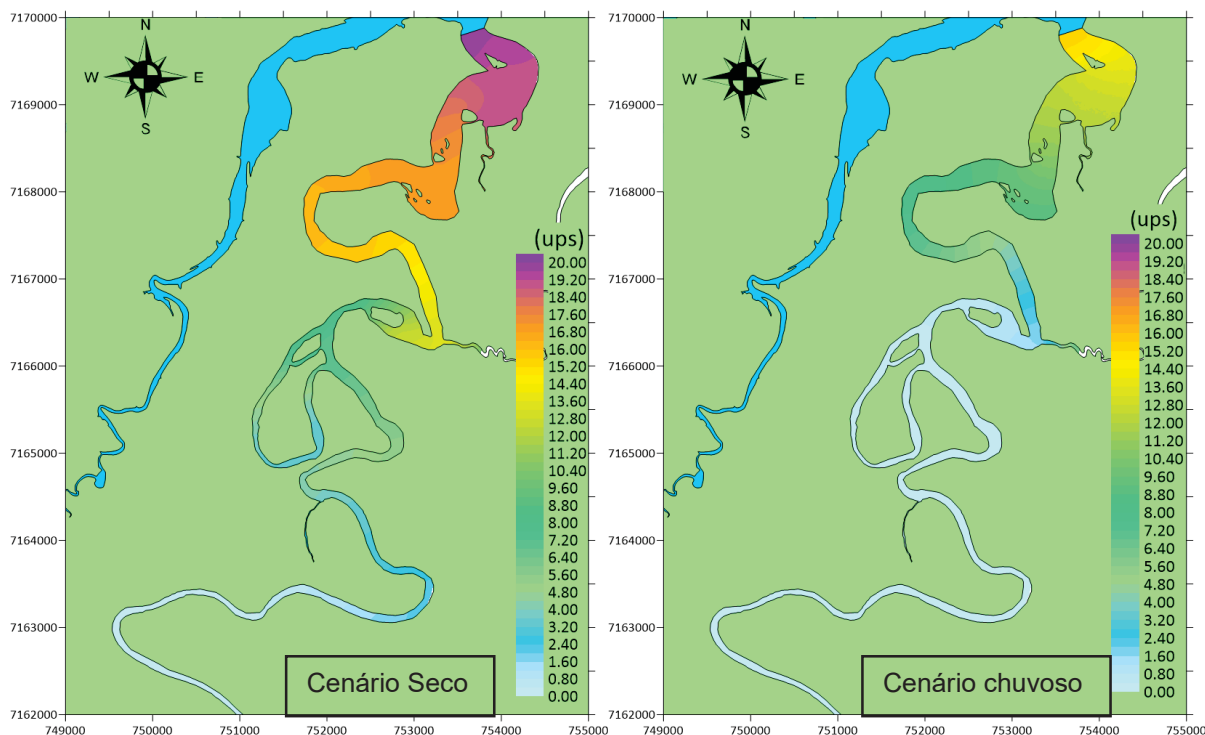


Figura 76 – Concentração de sal utilizada como condição inicial no modelo de qualidade da água para o cenário seco e chuvoso (Fonte: Autor).

Para as outras estações, os valores de salinidade aumentaram gradativamente conforme a proximidade da embocadura; na estação A, os valores de salinidade são os impostos pela condição de contorno na embocadura.

Esse resultado demonstra que as variações da maré podem resultar em um aumento gradual da salinidade durante um período seco, indicando uma entrada de sal mais pronunciada neste período. É importante ressaltar que, se as vazões afluentes permanecerem em níveis baixos por um período prolongado, a intrusão salina pode se tornar ainda mais significativa.

Estas variações podem ter um impacto significativo em espécies que dependem dessas variações sazonais nas concentrações de sal, indicando regiões de transições para essas espécies.

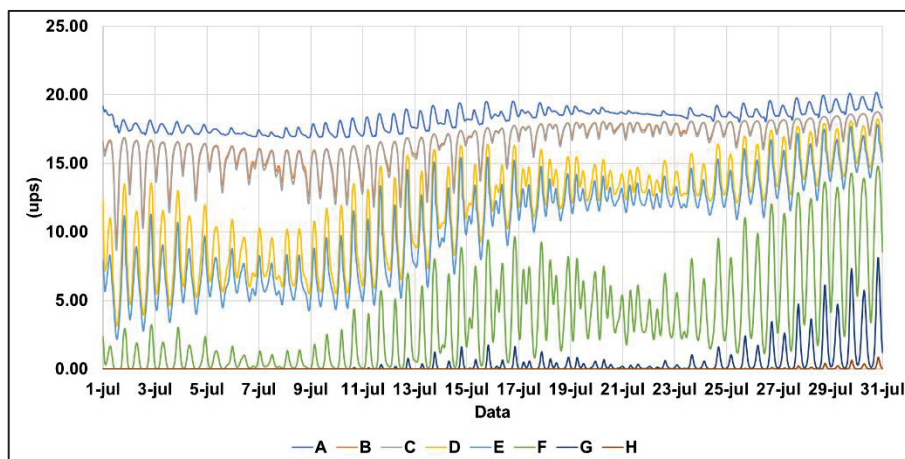


Figura 77- Série temporal para a salinidade no cenário seco nas estações selecionadas (Fonte: Autor).

A Figura 78 mostra a distribuição das concentrações de sal em dois instantes com as medições realizadas durante a campanha de campo, conforme indicado na Figura 27. Os valores medidos são apresentados em conjunto com os valores obtidos pelo modelo. É importante notar que os valores calculados pelo modelo foram superestimados em relação aos valores medidos.

É fundamental ressaltar que existem algumas considerações a serem feitas em relação à modelagem do transporte de sal, devido às simplificações presentes no modelo, o que pode levar a divergências em relação aos dados medidos. Uma dessas considerações envolve a batimetria. Como Medeiros (2003) explicou, a batimetria pode influenciar diretamente na intrusão salina. Portanto, uma discretização mais acurada dos valores batimétricos poderia resultar em resultados mais acurados.

Outra questão a se considerar são as condições de contorno nas fronteiras abertas. Devido à simplificação na modelagem do CEP, os valores de concentração de sal impostos podem não ser totalmente acurados, o que compromete os resultados do modelo.

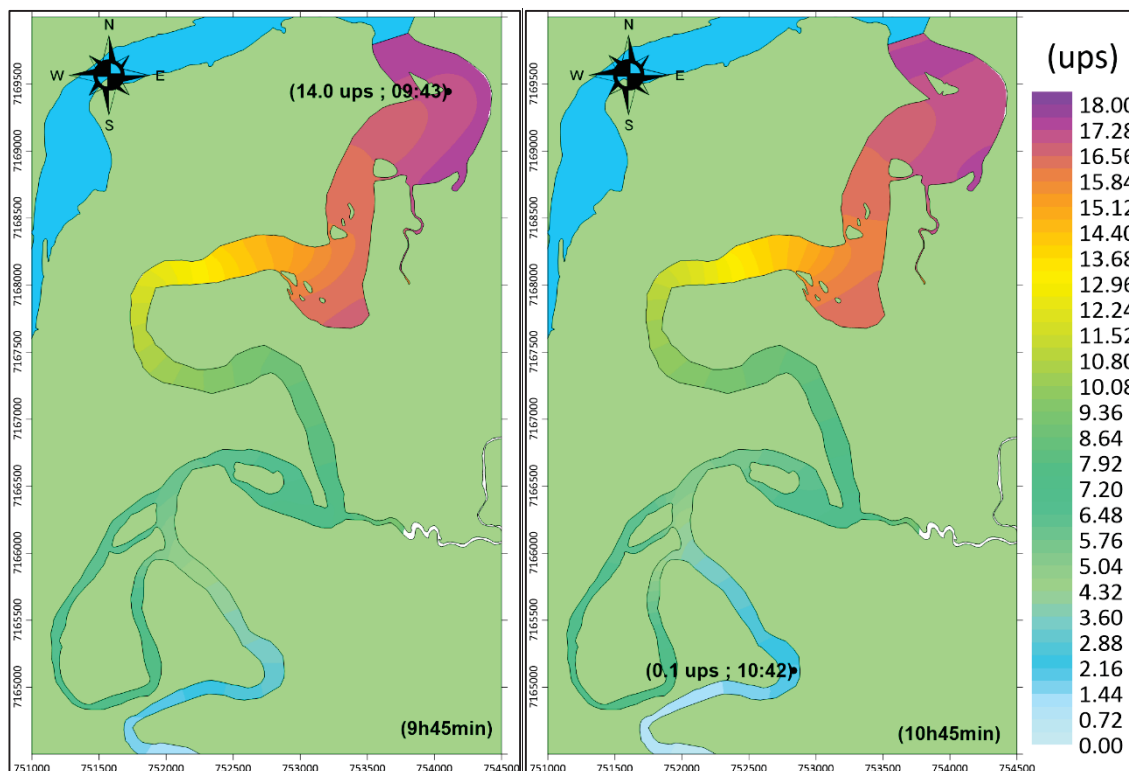


Figura 78 – Isolinhas da salinidade em dois momentos das medições para o dia da campanha de campo (12/07/2022) (Fonte: Autor).

A Figura 79 apresenta os valores de salinidade para o cenário chuvoso no rio Guaraguaçu nas estações de A a H, que representam as regiões com variações da salinidade no período simulado. Ao contrário do cenário seco, as concentrações de sal na região seguiram uma tendência oposta, diminuindo ao longo do tempo. Esse resultado sugere uma forte relação entre os altos valores de vazão e a redução das concentrações de sal nas estações de monitoramento. Um exemplo claro disso é observado nas estações B e C, onde os valores de salinidade diminuíram durante o período em que ocorreu o aumento dos valores de vazão.

Na estação D, após o dia 09/02/2020, o modelo não apresentou valores maiores que 0,5 ups, isso vai ao encontro de maiores valores de vazões calculado. A estação E após o dia 06/07/2020 também não apresentou valores maiores que 0,5 ups para o período simulado.

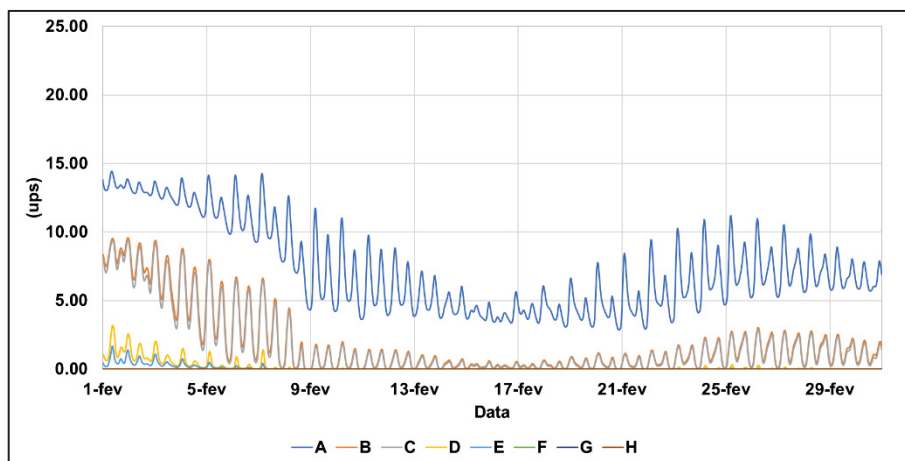


Figura 79 - Série temporal para a salinidade no cenário chuvoso para as estações selecionadas (Fonte: Autor).

A Figura 80 apresenta a persistência de concentrações maiores que 0,5 ups para o limite de água salobra os cenários modelados. Nota-se que para o cenário seco, o sal entra no estuário, atingindo uma extensão de 23 km. No cenário chuvoso, esta extensão diminui para 9 km, mostrando claramente a influência do aporte fluvial no processo de intrusão salina.

Esse resultado mostra que o rio apresenta gradientes de salinidade diferentes ao longo das estações no ano, podendo influenciar significativamente as concentrações de sal na região.

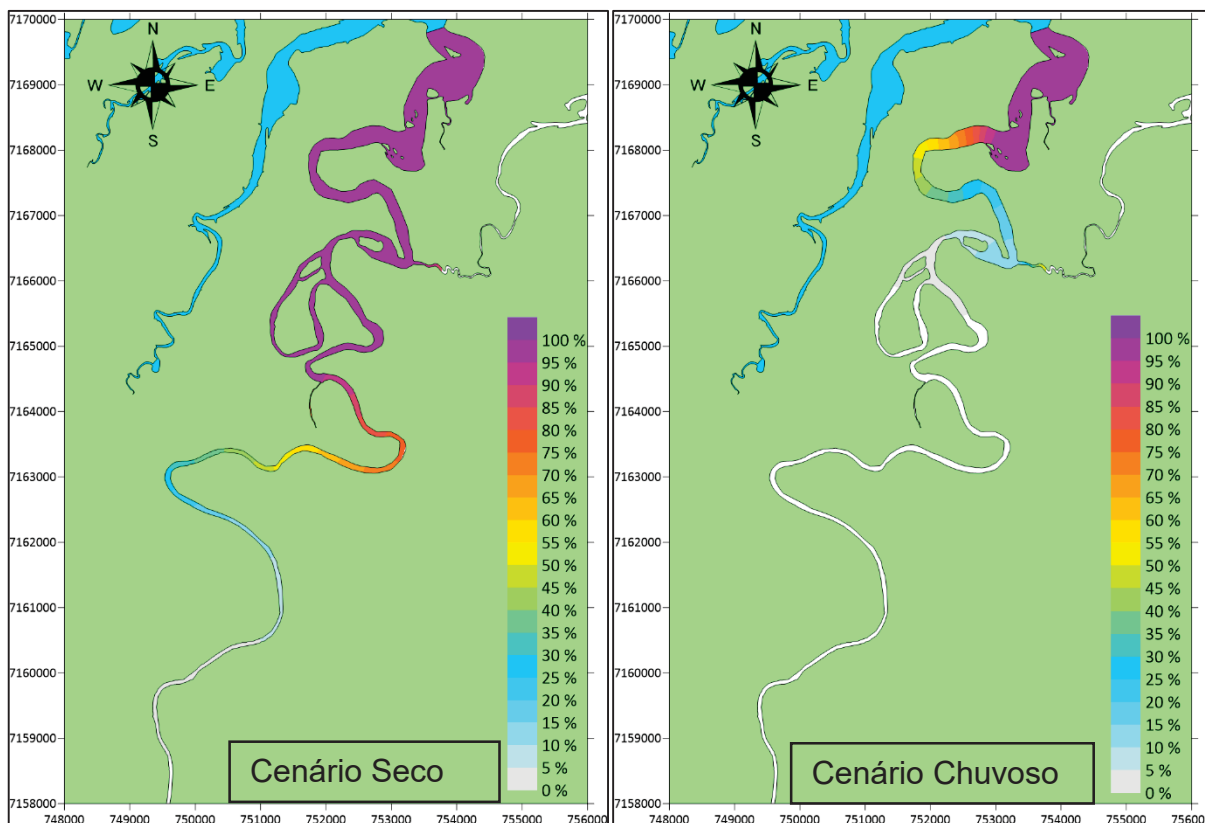


Figura 80 - Isolinha de persistências de concentração de sal maior que 0,5 ups entre 01/07/2020 à 31/07/2020 (período seco) e 01/02/2020 à 02/03/2020 (período chuvoso) (Fonte: Autor).

4.5 MODELOS DE TRANSPORTE

Nessa seção são apresentados os resultados dos modelos de transporte. Inicialmente são apresentadas a taxa de renovação, depois a Idade da Água e finalmente para a dispersão de partículas para os dois cenários simulados.

A Figura 81 apresenta a série temporal da taxa de renovação do cenário seco no rio Guarguaçu e Cambará. Foi necessário calcular a taxa de renovação para um período maior do que aquele simulado no modelo hidrodinâmico, 90 dias, usando ciclos de modelagem.

Na estação Z, a taxa de renovação convergiu mais rapidamente em comparação as outras estações, chegando a 100% em 4 dias simulados, já para a estação P, a taxa de renovação chegou a 100% em 5 dias (05/07/2022).

A estação I apresentou uma taxa de renovação de 100% depois de 19 dias de simulação. Contudo, para 7 dias depois do início da simulação os valores para essa estação apresentaram mais de 90% de taxa de renovação. A região da estação G foi a que apresentou maiores amplitudes nos valores da taxa de renovação. Após de 32 dias do início da simulação, os resultados permaneceram acima de 90% na taxa de renovação.

Na estação G, as oscilações estão relacionadas à penetração da onda de maré, que no período seco consegue entrar nas regiões mais internas do rio Guaraguaçu (Figura 45). As flutuações de vazão que, apesar do período apresentar vazões menores, quando comparado com o período chuvoso (Figura 53), também influenciaram as misturas nesta região. Outro resultado que pode ser analisado conjuntamente é o escoamento residual, que mostra uma inversão da corrente na região (Figura 60 e Figura 64)

A estação C apresenta o maior período com taxa de renovação acima de 90%, 43 dias após o início da simulação. Nessa estação os efeitos da maré são mais importantes e implicam numa taxa de renovação com menores oscilações quando comparados com a estação G.

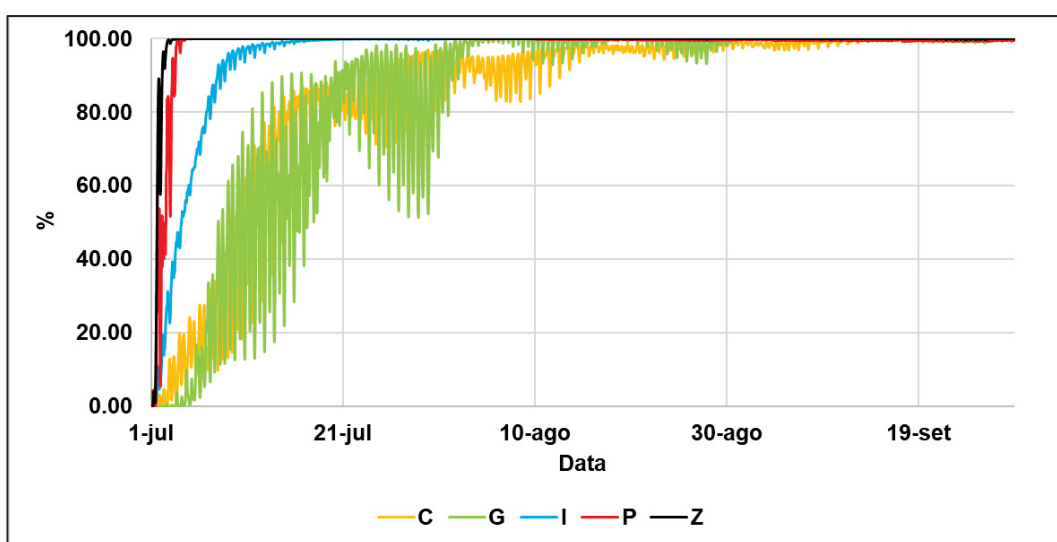


Figura 81 – Série temporal para a taxa de renovação da água para o cenário seco com 3 ciclos de modelagem (Fonte: Autor).

A Figura 82 apresenta a taxa de renovação para o cenário chuvoso. Na estação Z com o período chuvoso, a taxa de renovação atinge 100% em 2 dias, enquanto estação P, em 3 dias, ambas mais rápidas quando que as estações I e G, cuja a taxa de renovação foi de 100% em 5 dias. A região da estação C apresentou o maior tempo para a taxa de renovação, convergindo para 90%, em 10 dias.

Nesse contexto, a influência da vazão para os valores de taxa de renovação é maior nas estações I, G e C, que estão localizadas mais próximas da embocadura do rio Guaraguaçu e são mais influenciadas pelas variações da elevação da superfície livre quando comparado com as estações P e Z. No período chuvoso as taxas de renovação atinge 100% mais rapidamente e apresentam menores oscilações do que no período seco.

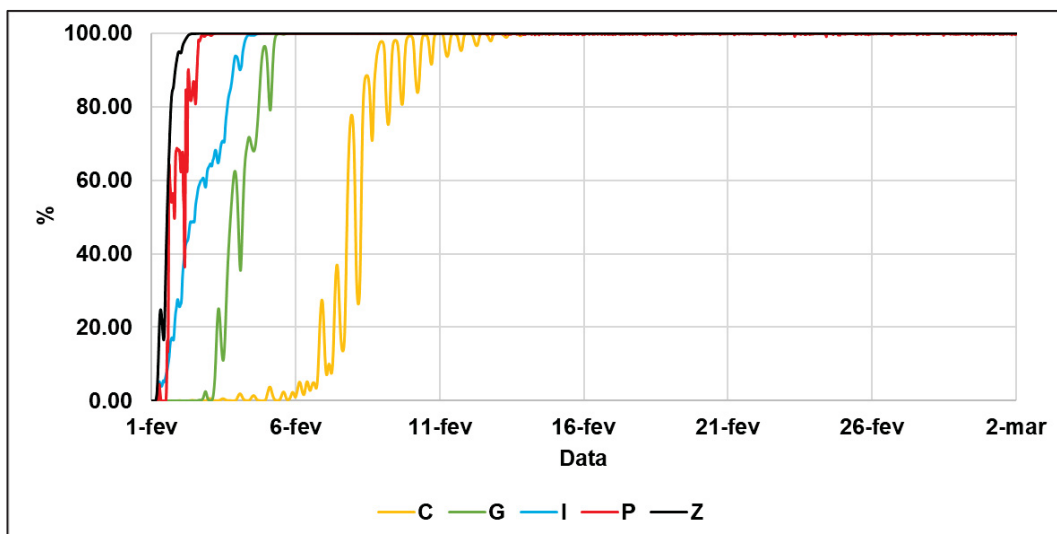


Figura 82 - Série temporal para a taxa de renovação da água para o cenário chuvoso (Fonte: Autor).

As Figura 83 e Figura 84 apresentam os resultados das séries temporais para os valores de Idade da Água para os cenários seco e chuvoso respectivamente.

Para o cálculo da idade da água com cenário seco, assim como na taxa de renovação da água, foi necessário realizar 3 ciclos nas modelagens, para que se pudesse aferir o comportamento das estações mais próxima da embocadura.

Para a estação G, observou-se que os maiores valores da idade da água se aproximaram de 30 dias. No entanto, uma grande oscilação ocorre nos valores da idade da água devido à influência dos ciclos de maré de sizígia e quadratura. Nessa região, os valores da idade da água variam entre 7 e 30 dias. Os resultados indicaram uma região de inversão da corrente, o que resulta em valores tão variáveis durante o período de simulação

Os resultados observados para a estação C contêm uma variação menor da idade da água em comparação a estação G, isso se deve à proximidade da região com a embocadura do rio Guaraguaçu, que permite uma melhor troca das águas para a região. Os valores variam entre 8 e 20 dias dependendo dos ciclos de maré de sizígia ou quadratura.

Os resultados encontrados para a estação I mostram, em uma escala menor, comportamento semelhante aos observados para as estações P e Z. Contudo, há uma variação maior entre os resultados na quadratura e na sizígia, com 3 e 12 dias de variação, após 30 dias de simulação. A estação P apresenta variações menores durante preamar e baixamar da sizígia, com intervalos de 3 a 6 dias. Já na estação Z, os valores da idade da água são menores, variando de 1 a 7 dias.

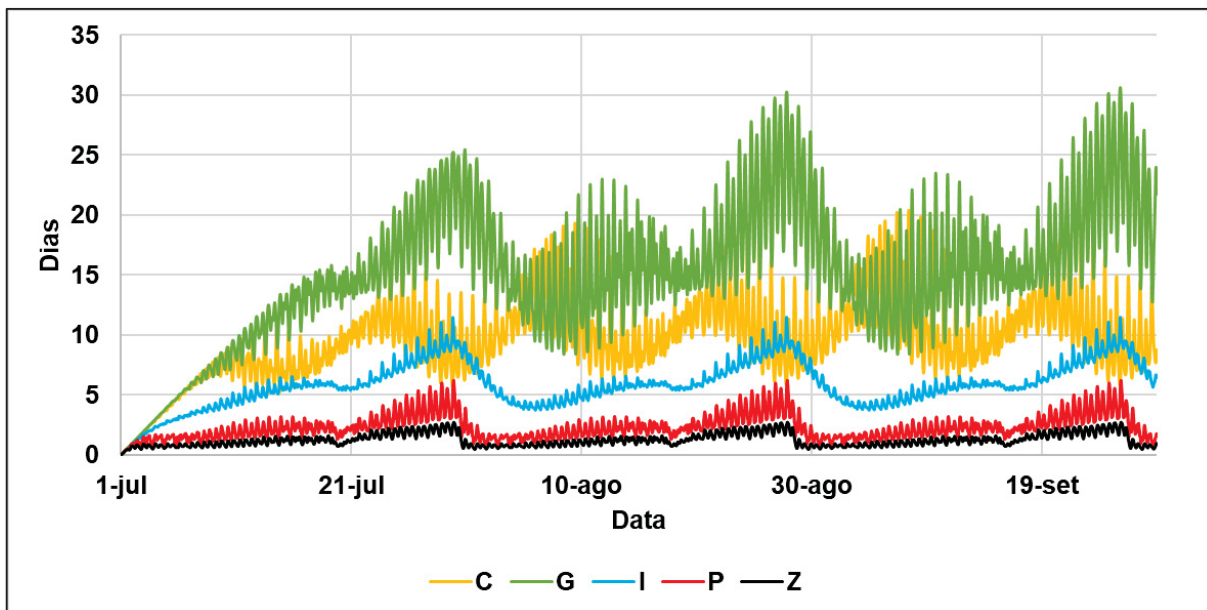


Figura 83 – Série temporal para idade da água para o cenário seco com 3 ciclos de modelagem (Fonte: Autor).

Para o cenário chuvoso (Figura 84), quando ocorrem os maiores valores de vazão os resultados obtidos para idade da água são inferiores ao cenário seco e não foi necessária a implementação de ciclos na simulação para que houvesse uma convergências dos resultados.

Diferentemente do cenário seco, a estação com os maiores valores de idade da água foi a estação C. Pode-se observar uma variação linear nos valores da idade da água ocasionada pelos menores valores de vazão até o dia 07/02/2022. Após esse período, houve uma diminuição dos valores da idade da água, que se deve ao aumento das vazões que ocorreram entre o período de 07/02/2022 a 09/02/2022, indicando que a variação no aporte fluvial influencia a região mais próxima da embocadura do canal. Após 20 dias de simulação os valores de idade da água variam de 5 e 6 dias para a estação C.

Nas outras regiões é possível observar uma diminuição nas oscilações, devido à influência do aporte fluvial expressivo. Os valores de idade da água são pequenos, variando entre 12 horas e 2 dias, para estas regiões.

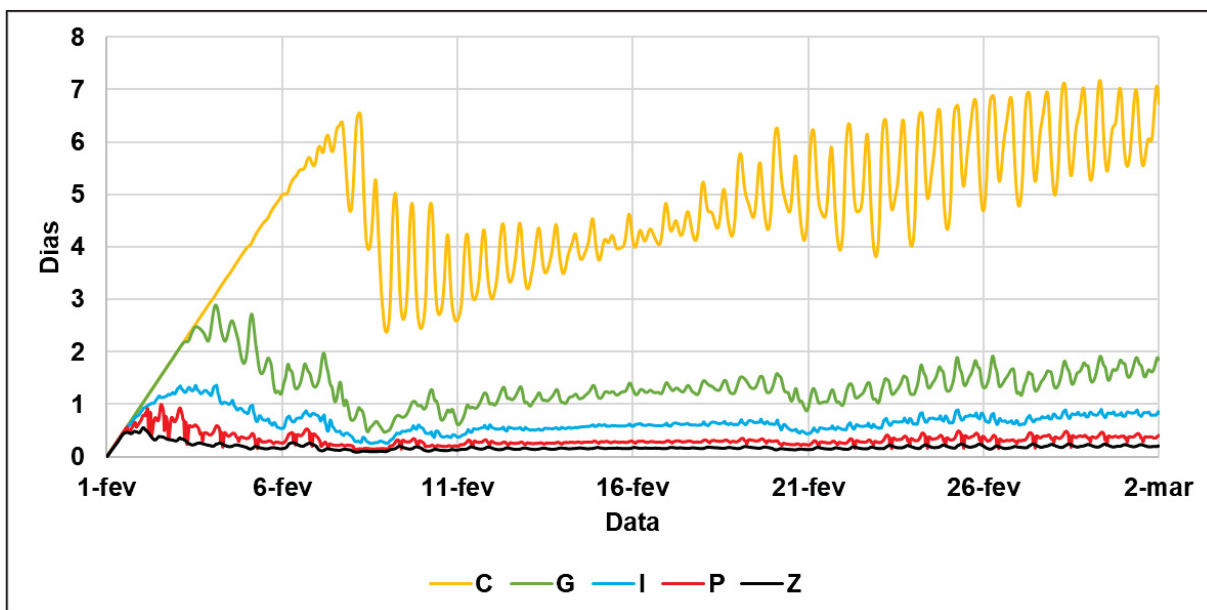


Figura 84 - Série temporal para idade da água para o cenário chuvoso (Fonte: Autor).

Os resultados referentes ao tempo de residência no cenário de condições secas, com absorção nula, são apresentados na Figura 85. Para realizar essa análise, foi necessário implementar ciclos ao longo de 240 dias de simulação. As partículas, ao entrar em contato com as fronteiras terrestres, refletem, permanecendo no sistema ao longo de todo o período de modelagem.

Destaca-se que, mesmo após um período de modelagem estendido, as partículas não conseguiram atravessar o domínio, indicando a presença de uma barreira hidrodinâmica significativa na região da embocadura. É interessante observar que a localização final das partículas, ao fim da simulação, corresponde às regiões onde a vegetação de braquiárias é mais evidente, como ilustrado na Figura 7. Este padrão sugere uma forte associação entre a dinâmica das partículas e a presença das braquiárias no sistema.

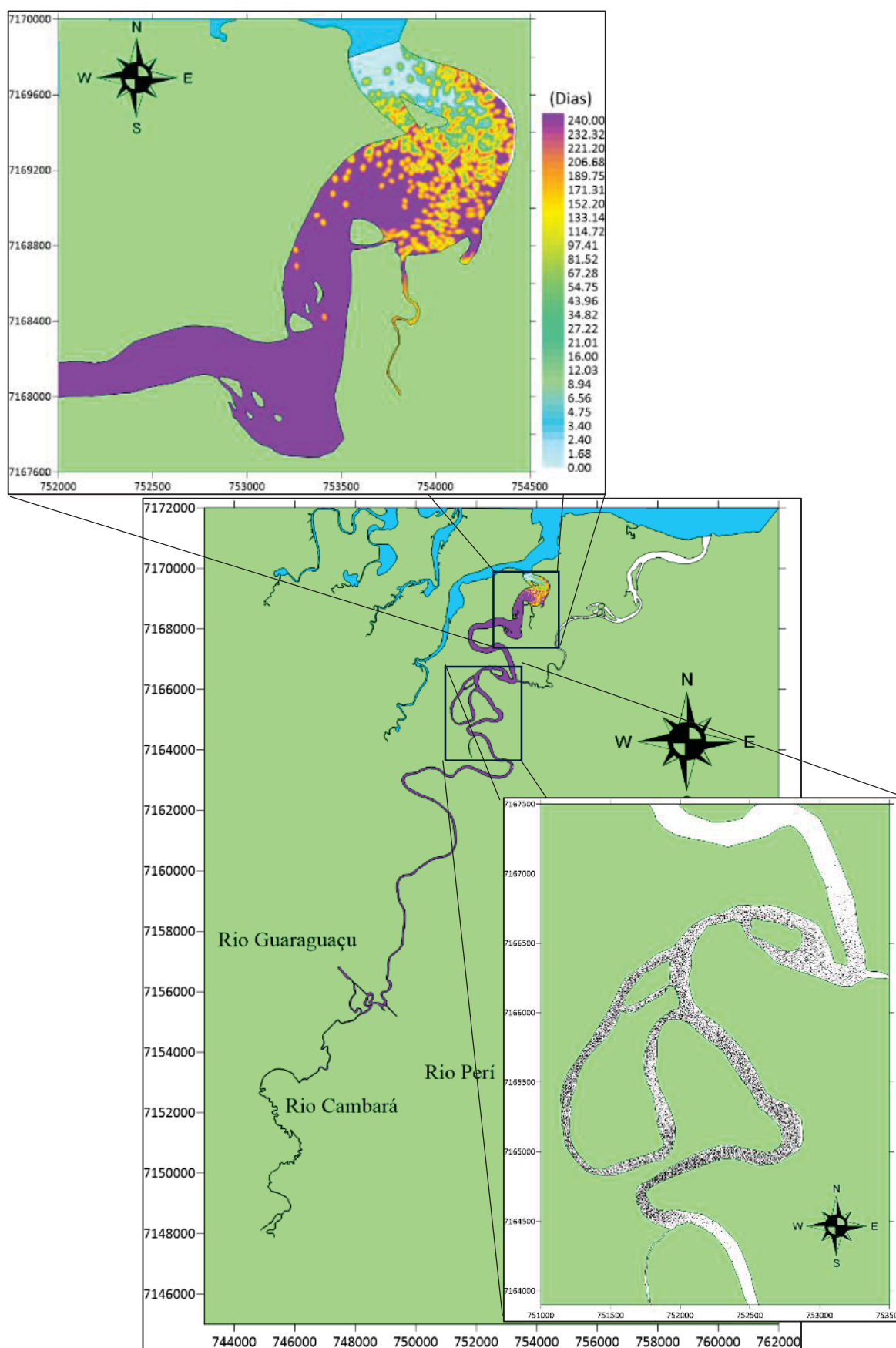


Figura 85 – Mapa das isolinhas do tempo de residência para o cenário seco com absorção nula e a posição das partículas no final da simulação (Fonte: Autor).

O resultado para o cenário seco com absorção total é apresentado pela Figura 86. Em comparação ao resultado anterior, os valores do tempo de residência tiveram uma drástica redução, com os maiores valores invertidos, sendo para a região da embocadura com 15 dias de tempo de residência. As partículas nas regiões mais internas do rio são “absorvidas” pela fronteira de terra, impedindo que alcancem a região da embocadura.

O perfil longitudinal dos valores do tempo de residência mostra as regiões mais internas valores entre 0 e 3 dias, indicando uma absorção rápida das partículas pelas fronteiras.

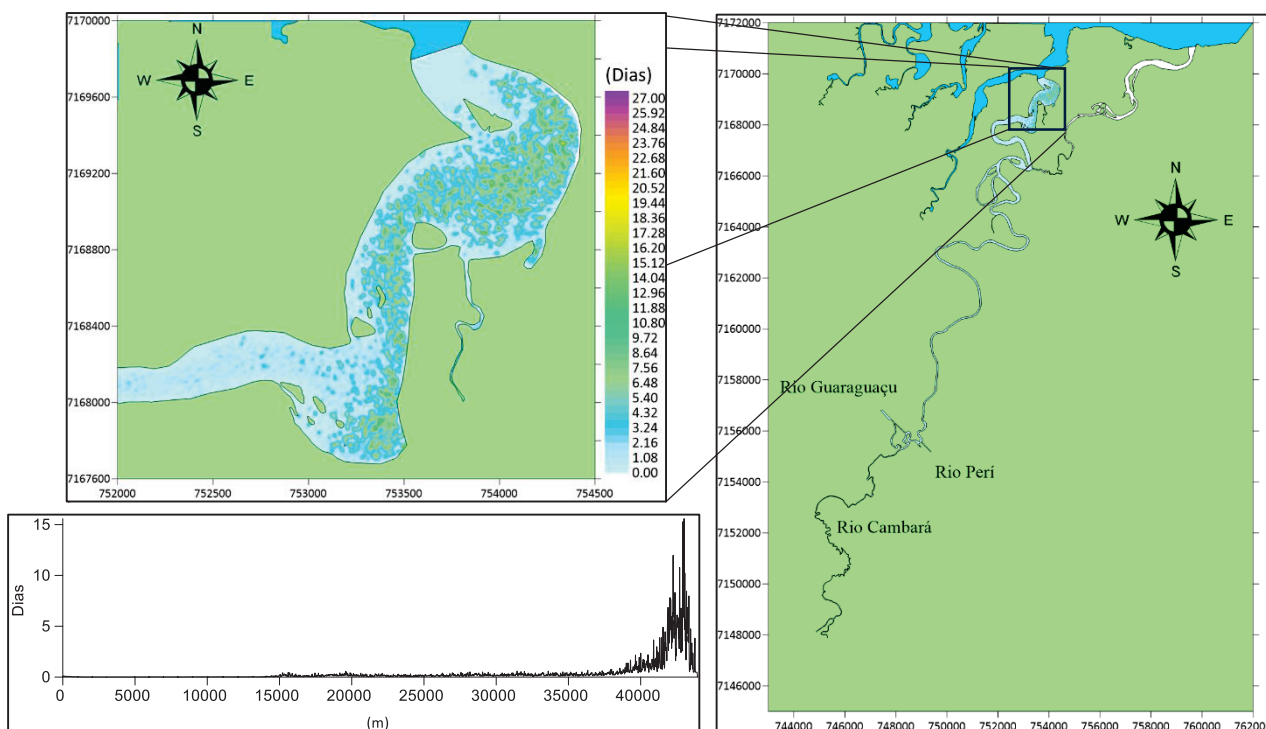


Figura 86 – Mapa das isolinhas do tempo de residência para o cenário seco com absorção total e perfil longitudinal do tempo de residência ao final da simulação (Fonte: Autor).

A Figura 87 apresenta os resultados para o cenário chuvoso com absorção nula. A região da embocadura apresentou os menores resultados para o tempo de residência. O resultado também indica que as regiões com maior tempo de residência são na parte mais interna do rio Cambará. De acordo com o perfil longitudinal, os valores para o tempo de residência são, em média, de 10 dias, diminuindo gradativamente para a região da embocadura.

Nesse tipo de abordagem para a representação do tempo de residência encontra-se valores divergentes do comportamento médio, como por exemplo o valor de 20 dias para a região entre 2,0 km e 2,5 km. Esse resultado que partículas para aquela região permaneceram 20 dias no sistema, certamente estas partículas foram retidas em alguma reentrância do rio.

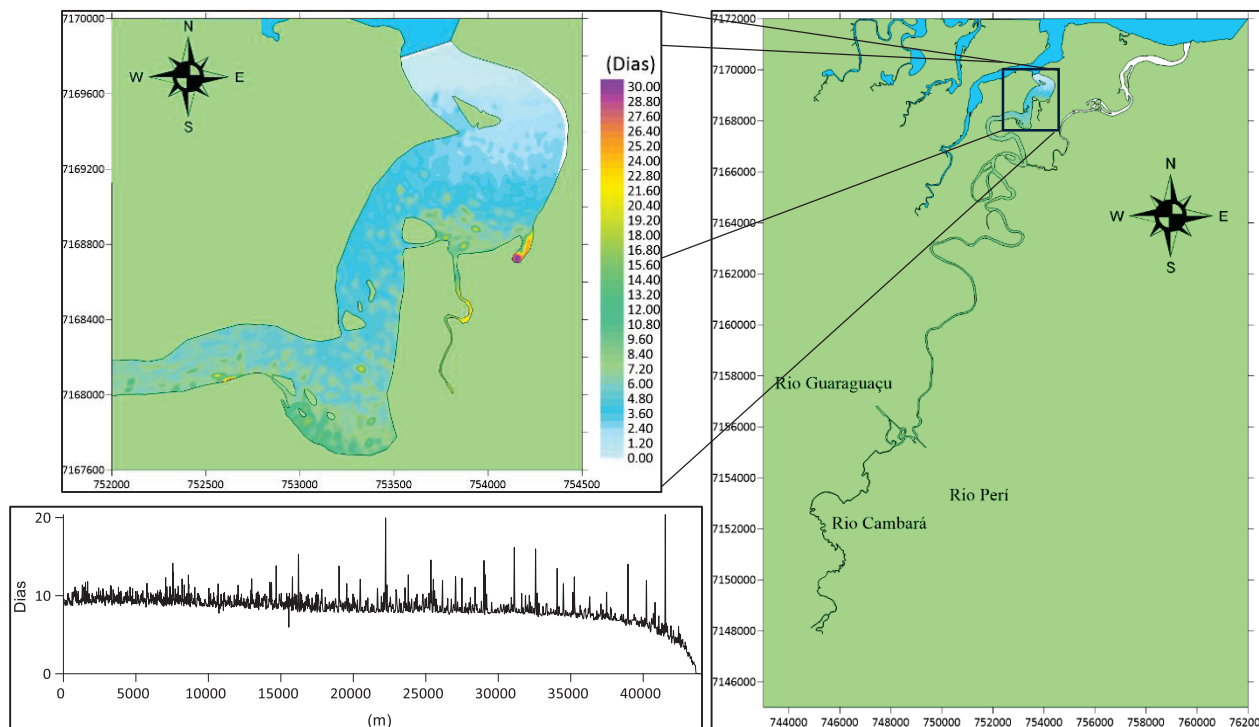


Figura 87 – Mapa das isolinhas do tempo de residência para o cenário chuvoso com absorção nula e perfil longitudinal do tempo de residência ao final da simulação (Fonte: Autor).

Para o cenário chuvoso, com absorção total os valores para o tempo de residência são mostrados na Figura 88. A região da embocadura obteve valores em média 4 dias, enquanto para a região mais interna do rio Cambará, os resultados variaram entre 0 e 2 dias.

Ao comparar os resultados do tempo de residência com os resultados do obtidos para a Taxa de Renovação e Idade da Água, torna-se evidente a dificuldade do modelo Lagrangeano simular regiões estreitas, especialmente quando se compara os resultados com absorção nula e absorção total. O modelo de transporte Lagrangeano demonstra ser mais adequado para regiões onde a influência das fronteiras é pequena, como a região da embocadura, que foi analisada neste estudo, especialmente quando se utiliza absorção não nula. Portanto, a aplicação deste modelo deve ficar limitada à região mais externa do rio Guaraguaçu.

No entanto, quando se utiliza absorção nula, o modelo de transporte Lagrangeano é capaz de oferecer uma análise mais crível. É importante ressaltar que o uso de absorção nula fica restrito a situações específicas que ocorrem em rios, para termos práticos de análise. No caso desse estudo pode ser aplicado ao estudo da movimentação da braquiária ou outra espécie de planta que tem a capacidade de se movimentar ao longo do rio pelas correntes.

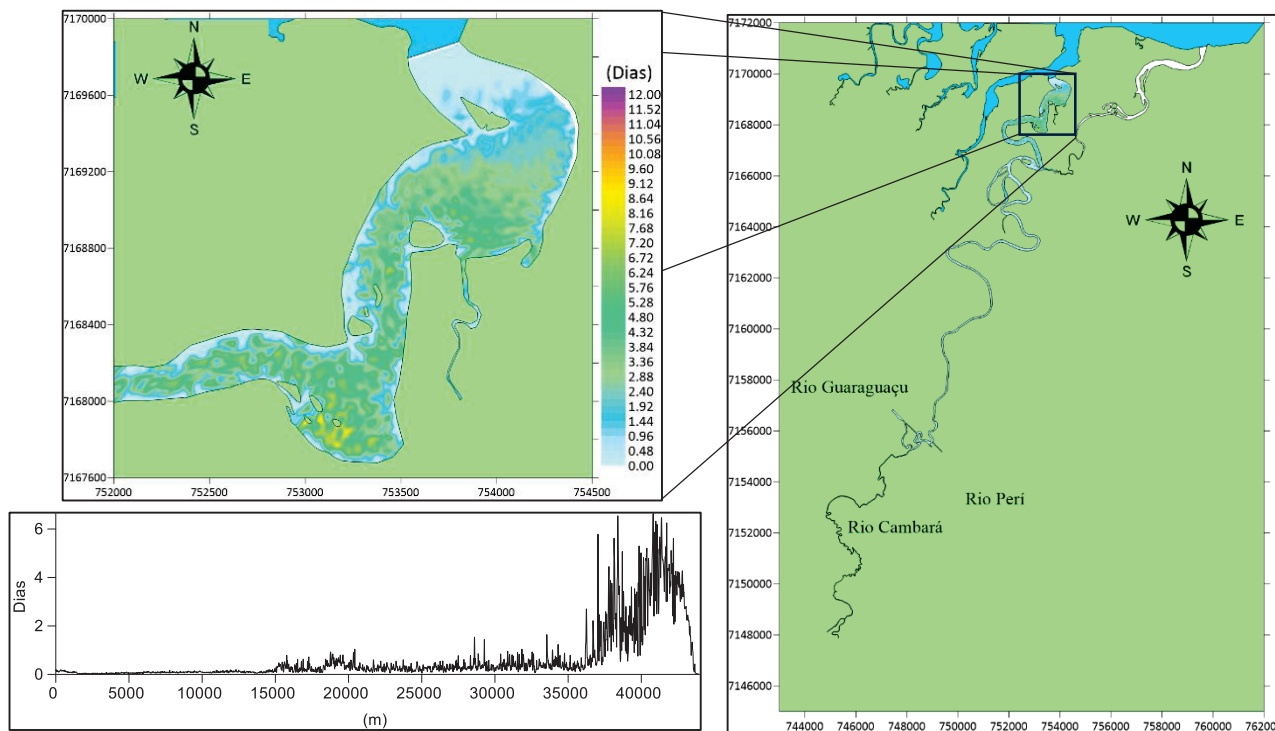


Figura 88 – Mapa das isolinhas do tempo de residência para o cenário chuvoso com absorção total e perfil longitudinal dos resultados no instante final da simulação (Fonte: Autor).

5 CONCLUSÕES

Neste estudo, foi empregado acoplamento dos modelos hidrológico e hidrodinâmico para investigar a hidrodinâmica, os processos de renovação da água e a intrusão salina no rio Guaraguaçu, utilizando os modelos SisBaHiA e SWAT.

A construção do modelo hidrológico evidenciou a sazonalidade marcante na região de estudo, com distintas variações nos valores de vazões afluentes aos rios Guaraguaçu e Cambará durante os períodos de inverno e verão. A calibração do modelo hidrológico apresentou resultados satisfatórios, contudo, os períodos de recessão não foram bem representados.

Os resultados do modelo hidrológico para diferentes períodos e cenários possibilitaram concluir que as vazões no rio Guaraguaçu exercem influência na elevação da superfície livre. Em condições de ausência de fluxos elevados, observou-se uma variação perceptível na elevação da superfície livre nas partes internas do rio Cambará, atingindo amplitudes de até 80 cm. No cenário chuvoso, as oscilações foram menos intensas nas regiões internas, com inclinações negativas evidenciadas em três momentos distintos. Destaca-se que a região do Caxetal apresentou as menores oscilações durante o cenário chuvoso.

A relação direta entre as vazões e a hidrodinâmica nos rios Guaraguaçu e Cambara foi evidenciada. Na embocadura do rio Guaraguaçu, durante o período seco, observou-se uma forte influência das oscilações na elevação da superfície livre, resultando em regiões de recirculação e inversão da corrente. No cenário chuvoso, houve uma tendência de vazante, acompanhada pelos maiores valores de vazões. A intrusão salina mostrou-se diretamente influenciada pela variação dos valores de vazão, com as menores extensões ocorrendo no período chuvoso e o oposto no cenário seco.

Pode-se fazer um paralelo entre a intrusão salina e a propagação das braquiárias ao longo do rio Guaraguaçu, considerando que a permanência dessa espécie está relacionada com a concentração de sal. Os resultados indicam uma correlação entre as concentrações de sal e a permanência das braquiárias ao longo do rio; análise feita por Bora (2019) corrobora com essa afirmação.

Os resultados do escoamento residual revelaram uma mudança significativa no comportamento hidrodinâmico na região da embocadura para os dois cenários, mostrando que no cenário seco ocorre a presença de vórtices, indicando possivelmente zonas de recirculação.

No tempo de residência, observou-se uma disparidade significativa entre os cenários. No cenário seco, com absorção nula, as partículas permaneceram retidas em regiões de inversão de maré e próximas à embocadura. No cenário seco com absorção total, os tempos de residência

foram consideravelmente menores, sugerindo rápida absorção das partículas pela morfologia dos canais. No cenário chuvoso, os valores para o tempo de residência foram menores em comparação com o cenário seco, variando de acordo com as diferentes absorções.

Este estudo mostrou ainda que o transporte eficiente de partículas para fora do sistema ocorre no cenário chuvoso, indicando que a vazão desempenha um papel crucial na diminuição do tempo de residência do rio Guaraguaçu e na prevenção de regiões de recirculação próximas à embocadura do canal. Esse padrão também foi observado nas Taxas de Renovação e Idade da Água, reforçando a influência significativa da vazão no sistema.

Recomenda-se, para futuros estudos, aprimorar a batimetria com mais seções ao longo do rio Cambará e calibrar o modelo hidrodinâmico com medições da elevação da superfície em áreas específicas. A implementação de modelagem tridimensional para investigar a formação da cunha salina seria uma abordagem adicional para a análise da intrusão salina. Ademais, a instalação de uma estação meteorológica próxima à região de medição das vazões, estudos adicionais de pedologia para uma caracterização mais precisa da área de estudo e a avaliação das diferenças causadas por chuvas orográficas na região seriam medidas vantajosas para aprimorar a representatividade do modelo hidrológico.

6 REFERÊNCIAS

ABBOT, M. B. AND BASCO, R. *Computational fluid mechanics, an introduction for engineering*. Longman Group, UK Limited. 1989

AB'SABER A. N. **Os domínios de natureza no Brasil – Potencialidades paisagísticas**. Ateliê Editorial. São Paulo. 2003.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos**. Brasília: ANA, 2019. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>. Acesso em: 20 de abril de 2023.

ALVES, F. C. **Análise Morfoestrutural das bacias dos rios Raraíba e Mamanguape (PB)**, com base em MDE-SRTM e Imagem PALSAR/ALOS-1. 2015. 181 f. Dissertação (Mestrado/Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015. Disponível em: <http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3J3BGME> Acesso em: 03 de julho de 2023.

AMARAL, K. J. **Estuário do Rio Macaé: Modelagem Computacional como Ferramenta para o Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos**. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ, Engenharia Civil, Rio de Janeiro 2003.

ANDRIGUETTO-FILHO JM (1993). *Institutional prospects in managing coastal environmental conservation units in Parana State, Brazil*. Coastal Zone '93, vol 1. Proc 8th Symp Coastal Ocean Manag 1993. Am Soc Civil Eng, New Orleans

ARNOLD, J. G., MORIASI, D. N., GASSMAN, P. W., ABBASPOUR, K. C., WHITE, M. J., SRINIVASAN, R., ... & KANNAN, N. *SWAT: Model use, calibration, and validation*. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1491-1508. 2012.

ALASKA SATELLITE FACILITY. *ASF Radiometric Terrain Corrected Products—Algorithm Theoretical Basis Document*; 2015. Disponível em: https://asf.alaska.edu/wpcontent/uploads/2019/03/rtc_atbd_v1.2_final.pdf. Acessos em 15 nov de 2023.

BALDISSIERA, G.C. **Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica SWAT (Soil and water assessment tool) para a bacia hidrográfica do rio Cuiába/MT**. Dissertação para o programa de pós-graduação em física e meio ambiente. Universidade Federal do Mato Grosso/MT. 2005.

BALEO, J.N., HUMEAU, P., CLOIREC, P.L., 2001. *Numerical and experimental hydrodynamic studies of a lagoon pilot*. *Water Res.* 35 (9), 2268–2276.

BIGARELLA, J. J.; KLEIN, R.; LOYOLA E SILVA, J.A.; PASSOS, E. **A Serra do Mar e a Planície Costeira do Paraná: Um problema de segurança ambiental e nacional.** (contribuições à geografia, geologia e ecologia regional). Florianópolis: UFSC, 2008. 391 p. (Série livros geográficos; 2) ISBN 978-85-60501-02-1

BORA, L. S. **Diferentes populações de uma Poaceae invasora respondem de maneira distinta ao aumento da salinidade.** Dissertação (Mestrado em Ecologia e Limnologia). Universidade Estadual de Maringá. Programa de Pós-Graduação em Ecologia de Ambientes Aquáticos Continentais. 2019

BOYNTON, W.R., GARBER, J.H., SUMMERS, R. et al. **Inputs, transformations, and transport of nitrogen and phosphorus in Chesapeake Bay and selected tributaries.** *Estuaries* 18, 285–314 (1995). Disponível em: <https://doi.org/10.2307/1352640>. Acesso em: 25 de julho de 2023

CIA BRASILEIRA DE PROJETOS E EMPREENDIMENTOS. 2019. **Plano da Bacia Hidrográfica Litorânea.** Produto 02: Disponibilidades Hídricas e Definições das AEGs. Revisão Final - Agosto de 2019

CONTENTE, R.F., STEFANONI, M.F. & SPACH, H.L. **Fish assemblage structure in an estuary of the Atlantic Forest biodiversity hotspot (southern Brazil).** *Ichthyol Res* 58, 38–50 (2011). Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10228-010-0192-0>. Acesso em: 30 de junho de 2023

CUCCO, A.; UMGIESSER, G. (2006) **Modeling the Venice Lagoon residence time.** *Ecological Modelling*, v. 193, n. 1-2, p. 34-51. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.07.043>. Acesso em: 5 de julho de 2023.

DALAZEN, J. P., CUNHA, C. DE L. DA N., & ALMEIDA, R. C. DE .. (2020). **Determinação das taxas de renovação das águas no complexo estuarino de Paranaguá.** *Engenharia Sanitaria E Ambiental*, 25(6), 887–899. <https://doi.org/10.1590/S1413-4152202020180019>

DAVIES, J. H. 1964. **“A Morphogenic Approach of Word Shorelines”.** *Z. Geomorphology*, 8:127-142.

DELHEZ, E. J. M.: **Transient residence and exposure times,** *Ocean Science.*, 2, 1–9. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/os-2-1-2006> Acesso em: 02 de outubro de 2023

DRONKERS, J. (1986). **Tidal Asymmetry and Estuarine Morphology.** *Netherlands Journal of Sea Research*, p.117-31

DYER, K.R., 1973. **Estuaries: A physical introduction.** N.Y.: John Wiley & Sons. 140 pp. p.140.

ELSET, G. A. S., ZANLORENCI, G. A., LAUTERT, L. F. C., NAZÁRO, M. G., MARQUES, P. H. C., QUADROS, J. **A contaminação do rio Guaraguaçu (Litoral do Paraná):** Limites e riscos ao desenvolvimento territorial regional. *Guaju, Matinhos*, v.5, n.2, p.54-70, jul./dez. 2019.

ESTIGONI, M. V. (2016). **Uso de modelagem de transporte de sedimentos e técnicas de hidrologia estatística para redução de incertezas nos estudos de assoreamento de reservatórios:** estudo de caso do reservatório da PCH Mogi-Guaçu - SP. Tese Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/T.18.2017.tde-10022017-085647>. Acesso em: 24 de julho de 2023.

FISCHER, J.S., J.D. DITMARS, AND A.T. IPPEN. (1972). *Mathematical Simulation of Tidal Time-Averages of Salinity and Velocity Profiles in Estuaries*. Ralph M. Parsons Laboratory, MIT, Cambridge, MA.

FRANÇA, J. M. B., NETO, J. C, PAULINO, W. D., SOUZA FILHO, F. A., **Simulação da compartimentação em reservatório no semiárido brasileiro uso da modelagem hidrodinâmica como ferramenta de gestão.** *Revista DAE, São Paulo*, v. 69, n. 231, p. 41-53, jul./set. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.36659/dae.2021.045>

GODOY, F. B. **Modelagem hidrológico-hidrodinâmica da Lagoa da Conceição - SC.** Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis, 2009.

HADDOUT, S.; IGOUZAL, M.; MASLOUHI, A. (2016). *Analytical numerical study of the salinity intrusion in the Sebou river estuary (Morocco) – effect of the “Super Blood Moon” (total lunar eclipse) of 2015.* *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 20, p. 3923-3945.

IGUCHI, T. **Modelo de Qualidade de Água 1D para rede de rios via método do elemento móvel acoplado ao modelo 2DH.** Dissertação de Mestrado/ Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil. 2006

INSTITUTO DE ÁGUA E TERRA DO PARANÁ (Brasil, 2020) **Rede Hidrográfica ottocodificada do Estado do Paraná**

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE **Plano de ação nacional para a conservação dos papagaios da Mata Atlântica.**, ICMBio, 2011.

JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY (JAXA). *Earth Observation Research Center. ALOS user handbook.* 2007, 146 p. Disponível em: <<http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/about/palsar.htm>>. Acesso em: 23 de agosto de 2023

KENOV, I.A.; GARCIA, A.C.; NEVES, R. (2012) *Residence time of water in the Mondego estuary (Portugal)*. Estuarine, Coastal and Shelf Science, v. 106, p. 13-22. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.> Acesso em: 24 de julho de 2023.

KUIJPER, K. AND VAN RIJN, L. C. (2011): *Analytical and numerical analysis of tides and salinities in estuaries; part II: salinity distributions in prismatic and convergent tidal channels*, *Ocean Dynamics*. SPRINGER, V61, 1743–1765P.

LADEIRA, M. I., **Espaço geográfico Guarani-Mbya: significado, constituição e uso**. Maringá: EDUEM, 2008.

LE HIR, P. ET AL. (2000). *Characterization of intertidal flat hydrodynamics*. *Continental Shelf Research*. v. 20, p. 1433–1459.

LIMA, L. S. **Acoplamento de modelos hidrológicos e hidrodinâmicos para prognóstico ambiental detalhado de longo prazo**. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica (COPPE). Rio de Janeiro. 2016.

LOPES, G. M. (2010). **Aplicação de um modelo numérico hidrodinâmico para as baías de Paranaguá e Antonina-PR**. Tese de Mestrado, Pós-Graduação em Sistemas Costeiros e Oceânicos da Universidade Federal do Paraná.

MASSELINK, G. & HUGHES, M. G. (2003). *Introduction to Coastal Processes and Geomorphology*. Hodder Arnold, London.

MEDEIROS, A. D. **A influência da batimetria no posicionamento da intrusão salina em estuários do rio itajaí-açu**. Dissertação submetida para Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica. (2003).

MIRANDA, L. B., CASTRO, B. M., KJERFVE, B. **Princípios de oceanografia física de estuários**. São Paulo: Ed. da Universidade de São Paulo, 2002.

MONSEN, N.E.; CLOERN, J.E.; LUCAS, L.V.; MONISMITH, S.G. (2002). *A comment on the use of flushing time, residence time, and age as transport time scales*. *Limnology and Oceanography*, v. 47, n. 5, p. 1545-1553. Disponível em: <https://doi.org/10.4319/lo.2002.47.5.1545>. Acesso em: 22 de julho de 2023.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; LIEW, M. W. V.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. *Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification Of Accuracy In Watershed Simulations*. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, v. 50, n. 3, p. 885–900, 2007. ISSN 0001–2351. Disponível em: <http://swat.tamu.edu/media/90109/moriasimodeleval.pdf>. Acesso em: 15 de Agosto de 2023.

NASA. *NASA Power Solar Data Overview*. 2020. Disponível em: <https://power.larc.nasa.gov/docs/methodology/solar/>. Acesso em: 3 de fevereiro de 2023.

NETO, A. R., CIRILO, J. A., DANTAS, C. E. O, SILVA, E. R. **Caracterização da formação de cheias na bacia do rio Uma em Pernambuco: simulação hidrológica-hidrodinâmica**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, vol. 20 n°2, Porto Alegre abr/jun. 2015, p.394-403.

NICKS, A.D. 1974. *Stochastic generation of the occurrence, pattern and location of maximum amount of daily rainfall*. p. 154-171. In Proc. Symp. Statistical Hydrology, Tucson, AZ. Aug.-Sept. 1971. USDA Misc. Publ. 1275. U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC.

PAIVA, A. M., 1992, **Desenvolvimento de um Modelo Numérico de Circulação para Estuários Estratificados**. Tese de Mestrado. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

PARANÁ. Governo do Estado do Paraná. **Zoneamento Ecológico - Econômico do Estado do Paraná – Litoral**. 360 pg. Curitiba, 2016

PIMENTEL FILHO, J.A., 2006. **Modelo hidrodinâmico 1D Multi-Calha com extravasamento lateral acoplado a modelo 2DH**. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

PINTO, L. R. C., FILIPPO, A., SOUZA, L. S., FERNANDES, A. M., OLIVEIRA, I. A., VIANA, C. G., ROMANO, A. L., **Estimativa do tempo de renovação da água do Complexo Lagunar da Baixada de Jacarepaguá através de modelagem numérica**. Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ - Vol. 42 - 3 / 2019 p. 289-29

POLLI B, CUNHA C, ALMEIDA R, GOBBI M. *Evaluation of the impacts caused by wind field and freshwater flow variations due to climate change on the circulation of the Paranaguá Estuarine Complex, Brazil*. Regional Studies in Marine Science 2021; 47: 101933. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2021.101933>. Acesso em: 4 de agosto de 2023.

PRITCHARD, D.W. (1967): *“What is an estuary: physical viewpoint”*. In: *Estuaries* (Ed. G.H. Lauff). Publ. No. 83, American Association for the Advancement of Science, Washington, D.C. pp 3-5.

PUCHALSKI, B.S. **Análise da dispersão do patógeno da cólera, proveniente da água de lastro, na baía de Paranaguá**. Trabalho de Conclusão de curso para engenharia ambiental UFPR. Curitiba, 2021

REIS Jr., D. S., 1998, **Desenvolvimento de um modelo 1D para rede de canais via método do elemento móvel com substituições sucessivas**. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

RIBEIRO, L. C. **caracterização do regime de vazões naturais de rios da América do Sul utilizando modelagem hidrológica**. Dissertação de M.Sc. Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul/RS, 2021.

ROSMAN, P.C.C. (2023) **Referência técnica do SisBaHiA**. Rio de Janeiro: Escola Politécnica da Área de Engenharia.

ROVERSI, F., ROSMAN, P. C. C., & HARARI, J. (2016). **Análise da renovação das águas do Sistema Estuarino de Santos usando modelagem computacional**. Revista Ambiente & Água, 11(3), 566–585. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1770>

SANTOS, F. M. **Modelagem concentrada e semi-distribuída para simulação de vazão, produção de sedimentos e de contaminantes em bacias hidrográficas do interior de São Paulo**. 2018. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

SHARPLEY, A.N. AND J.R. WILLIAMS, EDS. 1990. **EPIC-Erosion Productivity Impact Calculator, 1. model documentation**. U.S. Department of Agriculture. Agricultural Research Service, Tech. Bull. 1768.

SILVA, F. P., MARTINS, J. R. S., NOGUEIRA, F. F., PEREIRA, M. S., AMORIN, L. F. **Impacto do desassoreamento da intrusão salina em rios estuarinos urbanos: Estudo de caso do rio Cubatão, SP**. XII Encontro Nacional de águas Urbanas. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. 2018.

SIMMONS, H.B. (1955): “*Some effects of upland discharge on estuarine hydraulics*”. Proc. Amer. Soc. Civil Eng.81: 792/1-20.

TREMARIN, P.I.; LUDWING, T.A.V.; MOREIRA FILHO, H. (2008) **Thalassiosirales (Diatomeae) do rio Guaraguaçu, Bacia Litorânea, PR, Brasil**. Acta Botanica Brasilica, v. 22, n. 4, p. 1101-1113.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**, Ed. Universidade, UFRGS, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, 668p. 1998.

TWIGT, D.J., DE GOEDE, E.D., ZIJL, F. ET AL. **Coupled 1D–3D hydrodynamic modelling, with application to the Pearl River Delta**. Ocean Dynamics 59, 1077–1093 (2009). Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10236-009-0229-y>. Acesso em: 20 de outubro de 2023.

UNITED NATIONS EDUCATIONS, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION. 1991. **Guidelines on the study of seawater intrusion into rivers**. H. van der Tuin. Paris, França.

VAN DER KNIJFF, J. M., YOUNIS, J., & DE ROO, A. P. J. *Lisflood: a GIS-based distributed model for river basin scale water balance and flood simulation*. *International Journal of Geographical Information Science*, 24(2), 189-212. 2010.

VILLARS, M.T., DELVIGNE, G. A. L. 2001. *Estuarine processes*. Literature Review

WILLIAMS, J.R. 1995. Chapter 25. **The EPIC Model**. p. 909-1000. In *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications. Highlands Ranch, CO.

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

ZEE. **Zoneamento Ecológico Econômico do Litoral do Paraná**. Decreto Estadual nº 4.996 de 05 de setembro de 2016. Curitiba. 2016.

7 APÊNDICE

Os parâmetros utilizados na calibração do modelo hidrológico são apresentados na Tabela 11, os valores permitidos pelo modelo, os valores de calibração e as unidades de cada parâmetro.

Tabela 11 - Parâmetros calibrados para o ponto de monitoramento

GRUPO	NOME	MIN	MAX	VALOR	unidade
HRU	LATQ_CO	0	1	0.981	
HRU	PERCO	0	1	0.973	fraction
SOL	AWC	0.01	1	0.586	mm_H20/mm
SOL	K	0.0001	2000	1252.630	mm/hr
RTE	CHW	0	1000	57.000	m
RTE	CHL	-0.05	500	1.570	km
RTE	CHK	-0.01	500	0.182	mm/hr
HRU	CN3_SWF	0	1	0.870	
HRU	LAT_TTIME	0.5	180	17.743	days
HRU	SLOPE	0.0001	0.9	0.070	m/m
HRU	CN2	35	95	64.861	
HRU	CANMX	0	100	0.000	mm/H20
AQU	ALPHA	0	1	0.001	days

(Fonte: Autor).

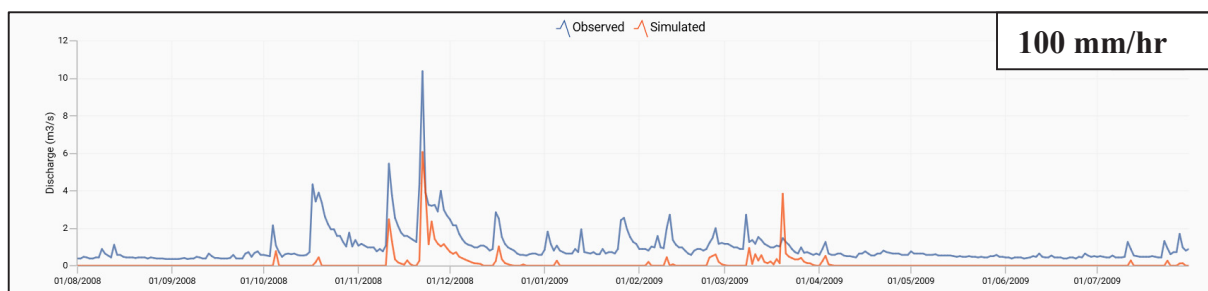
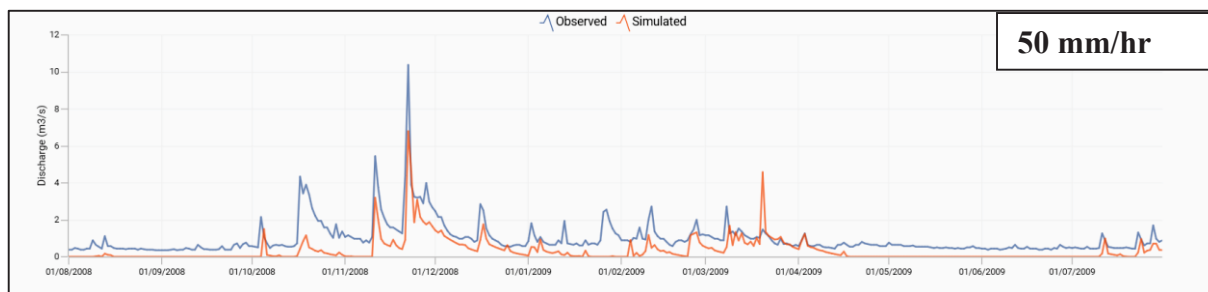
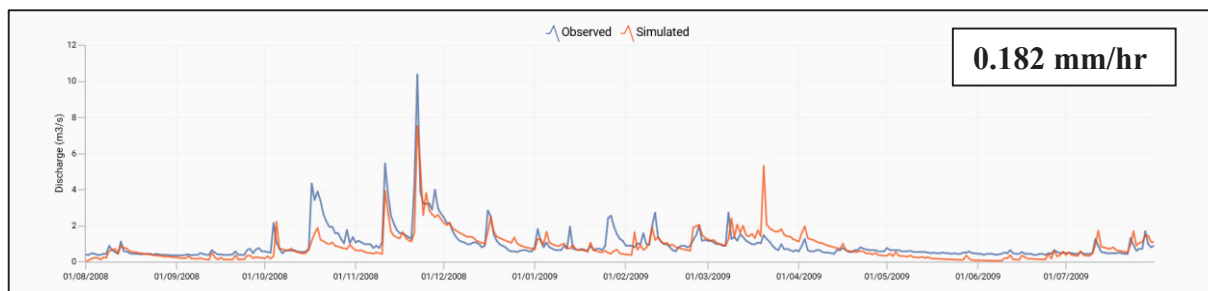
Conforme citado no item 4.3.9, a seguir serão apresentados os gráficos para diferentes valores de CHK para o período que foi calibrado o modelo, sendo o valor utilizado de 0.182, 50 e 100 mm/hr. Esse parâmetro tem a função de regular a perda de água para o lençol freático, isso equivale a quanto maior o valor de CHK, maior será a perda de água no canal e quanto menor o CHK, menor será a perda. Dessa maneira, um valor menor que 2.5 tem pouca perda de água pelo solo, contendo alta porcentagem de silte e material de fundo consolidado. A Tabela 12 apresenta exemplos de valores referente à condutividade hidráulica (https://swat.tamu.edu/media/116078/inputs_swatplus.pdf)

Tabela 12 - Exemplos de valores de condutividade hidráulica para vários materiais de leito (de Lane, 1983)

Marial de fundo	Característica	Condutividade Hidráulica
Taxa de perda muito alta	Cascalho muito limpo e grande areia	>127 mm/hr
Alta taxa de perda	Areia e cascalho limpos	51-127 mm/hr
Taxa de perda moderada	Mistura de areia e cascalho com baixo teor de silte e argila	25-76 mm/hr
Taxa de perda baixa	Mistura de areia e cascalho com alto teor de silte-argila	6-25 mm/hr

Marial de fundo	Característica	Condutividade Hidráulica
Taxa de perda muito baixa	Material do leito consolidado; alto teor de silte-argila	0.025-25 mm/hr

(Fonte: Autor).



(Fonte: Autor).