

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA OCEÂNICA

ESTUDO NUMÉRICO HIDRO-MORFODINÂMICO DA LAGOA MIRIM, RS, BRASIL: ANÁLISE
DE CENÁRIOS DE DRAGAGEM E SEUS IMPACTOS

Por

Antonio Raylton Rodrigues Bendô

Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Oceânica

Orientador: Prof. Dr. Wiliam Correa Marques

Coorientador: Prof. Dr. Eduardo de Paula Kirinus

Rio Grande, abril, 2020

ESTUDO NUMÉRICO HIDRO-MORFODINÂMICO DA LAGOA MIRIM, RS, BRASIL: ANÁLISE
DE CENÁRIOS DE DRAGAGEM E SEUS IMPACTOS

Por

Antonio Raylton Rodrigues Bendô
Engenheiro Civil

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica (PPGEO)
da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Área de Concentração: Engenharia Costeira

Orientador: Prof. Dr. Wiliam Correa Marques

Coorientador: Prof. Dr. Eduardo de Paula Kirinus

Comissão de Avaliação: (na versão apresentada à banca)

Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos

PPGEO/FURG

Prof. Dr. Gustavo Pacheco Tomas

UFPR

Prof. Dr. Liércio André Isoldi
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica

Rio Grande, 03 de Abril de 2020

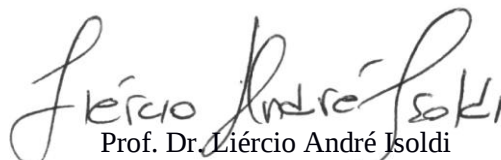
**“ESTUDO NUMÉRICO HIDRO-MORFODINÂMICO DA LAGOA MIRIM, RS, BRASIL:
ANÁLISE DE CENÁRIOS DE DRAGAGEM E SEUS IMPACTOS”**

ANTONIO RAYLTON RODRIGUES BENDÔ

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de:

MESTRE EM ENGENHARIA OCEÂNICA

Tendo sido aprovada em sua forma final pela Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica



Prof. Dr. Liércio André Isoldi
Coordenador do PPGEQ/FURG

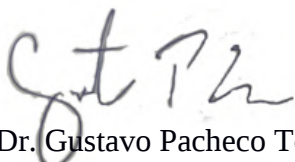
Banca Examinadora:



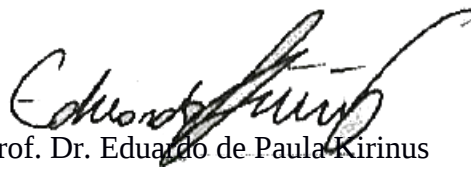
Prof. Dr. Wiliam Correa Marques
Orientador – PPGEQ/FURG



Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos
Membro Interno – PPGEQ/FURG



Prof. Dr. Gustavo Pacheco Tomas
Membro Externo – UFPR



Prof. Dr. Eduardo de Paula Kirinus
Coorientador – UFPR

RESUMO

Muitos ambientes costeiros apresentam condições naturais de navegação com águas relativamente calmas e rasas, que fornecem uma conexão entre as vias navegáveis marítimas e continentais. Para garantir ou mesmo expandir a capacidade de transporte por essas vias, é necessário que obras de dragagem sejam executadas com frequência, uma vez que o assoreamento de canais de navegação impede a passagem de embarcações, restringindo ou mesmo inviabilizando a movimentação pelo meio aquaviário. Esse processo associa os canais hidroviários do país a um ciclo curto e oneroso. Inserido nesse contexto, o trabalho tem o objetivo de avaliar os processos hidrodinâmicos, de transporte de sedimentos e investigar estratégias de dragagem e bota-fora nos canais de navegação da Hidrovia da Lagoa Mirim. Para atingir esses objetivos, a Lagoa Mirim foi modelada numericamente utilizando os módulos hidrodinâmico TELEMAC-2D, morfodinâmico SISYPHE e de dragagem NESTOR, todos pertencentes à suíte de modelagem Open TELEMAC-MASCARET. As simulações são de cinco anos e abrangem o período de janeiro de 2000 a dezembro de 2004. Os resultados mostraram que o padrão temporal de circulação e transporte de sedimentos do sistema é governado, principalmente, pela ação das descargas dos rios. Enquanto que a ação dos ventos atua na modulação do nível de água na parte sul da laguna, e contribuem para a formação de células de recirculação. O modelo morfodinâmico representou com sucesso os padrões de erosão e deposição; além disso, foram identificados dois padrões distintos de deposição da Lagoa Mirim. O primeiro mostra que a menor fração do sedimento (silte) é predominante nas regiões mais profundas, enquanto que nas áreas rasas as frações de areia e silte têm a mesma proporção. O segundo diz respeito à distribuição espacial, no setor central foi relatado uma maior predominância de silte quando comparamos com os setores norte e sul. A comparação dos cenários de dragagem e bota-fora, com diferentes profundidades e sítios de despejo, mostrou que a escolha adequada da estratégia pode reduzir o esforço de dragagem. Além disso, essas operações podem causar significativas variações nos parâmetros hidro-morfodinâmicos, indicando um aumento efetivo na evolução do fundo dos canais de navegação em comparação ao cenário não modificado.

Palavras-Chave: Lagoa Mirim; Hidrovias; Hidrodinâmica; Transporte sedimentar; Dragagem; Modelagem Numérica.

ABSTRACT

Many coastal environments have natural conditions suitable to navigation, with relatively calm and shallow waters that provide a connection between maritime and continental waterways. To guarantee or even expand the mobility capacity by waterways, it is necessary that dredging works be performed frequently, since the silting up of navigation channels prevents the passage of vessels, restricting the movement through the waterway. This reality links the Brazilian waterways to a short and expensive maintenance cycle. In this context, this work aims to evaluate hydrodynamic processes of sediment transport and to investigate operational strategies for the navigation channels in the Mirim Lagoon Waterway. To achieve these objectives, Mirim Lagoon was numerically modeled using the hydrodynamic module TELEMAC-2D, the morphodynamic module SISYPHE, and the dredging module NESTOR, all belonging to the Open TELEMAC-MASCARET modeling suite. The simulations have a duration of five years and cover the period from January 2000 to December 2004. The results showed that the discharge of rivers mainly governs the temporal pattern of circulation and sediment transport in the system. The action of the winds creates a barotropic pressure gradient on the surface and its variability causes a disturbance in circulation and transport, acting mainly in the formation of recirculation cells. The morphodynamic model successfully represented the patterns of erosion and deposition, and, in addition, two distinct deposition patterns of Mirim Lagoon were identified. The first pattern shows that the smallest fraction of sediments (silt) is predominant in deeper regions, while in shallow regions the fractions of sand and silt have the same proportion. The second pattern presents spatial distribution: in the central sector, a greater predominance of silt was found when compared to the northern and southern sectors. The comparison of the different dredging and dumping scenarios indicated that dredging and dumping strategies can reduce dredging effort in the navigation channels. Furthermore, these operations can cause significant variations in hydro-morphodynamic parameters, indicating an effective increase in the bottom evolution of the navigation channels, compared to the unmodified scenario.

Palavras-Chave: Mirim Lagoon; Waterways; Hydrodynamic; Sediment Transport; Dredging; Numerical modeling.

ÍNDICE

1	Introdução	14
1.1	Justificativa	15
1.2	Objetivos	18
1.3	Estrutura da dissertação	18
2	Revisão de literatura	19
2.1	Panorama hidroviário mundial	19
2.2	Panorama hidroviário brasileiro	21
2.3	Dragagem	22
2.3.1	Dragagem de implantação e aprofundamento	24
2.3.2	Dragagem de manutenção	24
2.3.3	Dragagem de remediação ou ambiental	25
2.3.4	Dragagem de mineração	25
2.4	Equipamentos de dragagem	26
2.4.1	Equipamentos mecânicos	26
2.4.2	Equipamentos hidráulicos	27
2.5	Modelagem numérica aplicada a estudos de dragagem	29
2.5.1	Estudos mundiais	31
2.5.2	Estudos nacionais	34
3	Área de estudo	36
3.1	A bacia da Lagoa Mirim	36
3.2	Aspectos hidrodinâmicos	39
3.3	Aspectos morfodinâmicos e sedimentares	41
4	Materiais e métodos	44
4.1	O sistema TELEMAT-MASCARET	44
4.1.1	Módulo hidrodinâmico - TELEMAT-2D	44
4.1.2	Módulo morfodinâmico - SISYPHE	47
4.1.3	Módulo de operações de dragagem - NESTOR	54
4.1.4	Acoplamento entre os modelos	58
4.2	Geração de malha	58
4.3	Condições iniciais e de contorno	60
4.3.1	Modelo hidrodinâmico	60
4.3.2	Modelo morfodinâmico	61

4.4	Performance e validação	62
4.4.1	Sensibilidade de malha	62
4.4.2	Validação	63
4.5	Cenários de dragagem e despejo	67
5	Resultados e discussões	70
5.1	Aspectos hidrodinâmicos da Lagoa Mirim	70
5.1.1	Descarga	70
5.1.2	Nível de água	76
5.1.3	Velocidade de corrente	82
5.2	Transporte de sedimentos e morfodinâmica	91
5.2.1	Tensão de cisalhamento com o fundo	91
5.2.2	Distribuição sedimentar	94
5.2.3	Evolução morfológica	97
5.3	Operações de dragagem	100
5.3.1	Eficiência das estratégias	102
6	Conclusão	108
7	Limitações do estudo e propostas para trabalhos futuros	112
7.1	Limitações do estudo	112
7.2	Propostas para trabalhos futuros	112
8	Referências	114

LISTA DE FIGURAS

1.1	Fatores de emissão para cada modal de transporte, medido em gCO_2/tku ou $kgCO_2/mil\ tku$. Fonte (CNT, 2013).	15
1.2	Mapa de localização da Hidrovia da Lagoa Mirim (HLM). Os canais de dragagem estão representados pela cor vermelha. Ao norte da HLM se encontra o Canal do Sangradouro (CS) e ao sul o Canal de Santa Vitória do Palmar (CSVP).	16
2.1	Etapas da dragagem, modificada de (Highley et al., 2007; Manap e Voulvoulis, 2015).	23
2.2	Equipamentos mecânicos de dragagem. Modificados de van't Hoff e van der Kolff (2012).	28
2.3	Equipamentos hidráulicos de dragagem. Modificados de van't Hoff e van der Kolff (2012).	29
2.4	Esquema de funcionamento das dragas pneumáticas, modificada de Bray et al. (1997).	30
3.1	Localização das sub-bacias de drenagem dos principais rios da Lagoa Mirim. Fonte: Munar et al. (2018).	37
3.2	Composição dos sedimentos superficiais do fundo da Lagoa Mirim. Os quadros (A) e (B) mostram a classificação dos sedimentos conforme Shepard (1954) e (B) Wentworth (1922). Modificado de Vieira et al. (2020).	42
4.1	Transporte de sedimento no SISYPHE, em suspensão Q_s e de fundo Q_b por rolamento (a), saltação (b) e arrasto (C). E e D se referem, respectivamente, aos fluxos de erosão e deposição. As camadas sedimentares e impermeáveis estão representadas pelas cores laranja e cinza, nessa ordem.	49
4.2	Diagrama de Shields para tensão inicial de arraste (Julien, 2010).	51
4.3	Figura ilustrativa de delimitação dos polígonos de dragagem e descarte.	56
4.4	Imagem representativa de dragagem <i>hindcast</i> em diferentes operações em uma hidrovia. Modificado de Maerker e Malcherek (2010).	57
4.5	Dragagem por critério de profundidade, h_0 é a profundidade inicial do leito. As imagens (a) e (b) são respectivamente antes e depois da atividade. Modificada de Maerker (2013).	57
4.6	Esquema de acoplamento entre: A) TELEMAC-2D e SISYPHE. Na imagem B) mostra o funcionamento do NESTOR: I. Os parâmetros de velocidade, profundidades e fricção são repassados ao modelo morfodinâmico; II. O SISYPHE transporta os sedimentos e evolução o fundo; III. o NESTOR ler a batimetria atualizada e faz dragagem ou despejo; VI. o SISYPHE reconstrói a batimetria e da um novo leito para o TELEMAC-2D. Adaptado de Maerker e Malcherek (2010).	59

4.7	Dados utilizados como condição de contorno nas simulações hidrodinâmicas. A linha preta se refere ao nível imposto com condição de contorno na foz do Canal São Gonçalo.	61
4.8	Localização dos pontos escolhidos para essa análise (a) e malhas computacionais (b) , (c) e (d).	62
4.9	Comparação entre os níveis simulados e observados nas estações de SI e SVP (a esquerda) e seus respectivos coeficientes de correlação (a direita).	66
4.10	Cenários com diferentes profundidade nos Canais do Sangradouro (CS) e Santa Vitória do Palmar (CSVP).	69
4.11	Cenários de despejo do material dragado dos canais A) do Sangradouro (CS) e B) de Santa Vitória do Palmar (CSVP).	69
5.1	(A) Descarga dos rios Jaguarão, Tacuarí e Cebollati para a LM. (B) Contribuição de água doce do rio Cebollati para a Lagoa Mirim em porcentagem durante todo o período simulado (2000-2004).	71
5.2	(A) Média mensal de descarga que entra e sai da LM (2000-2004). (B) Séries temporais de Vazão que entra na LM (Jaguarão + Tacuarí + Cebollati) (linha preta) e sua média (linha vermelha pontilhada).(C) Série temporal de descarga calculada para o Canal São Gonçalo (em preto) e sua média (em vermelho).	73
5.3	(A) Séries temporais de Vazão total (Jaguarão + Tacuarí + Cebollati) em vermelho e vazão calculada da LM para o CSG e (B) Espectro cruzado de energia usando a ondaleta Chapéu Mexicano. A região dentro do contorno da linha pontilhada tem 95% de confiança e indica o cone de influência onde os efeitos de borda são importantes. (C) Espectro de energia integrado no tempo. A linha pontilhada representa um nível de confiança de 95%. (D) Séries temporais de intensidade dos ventos (vermelho) e vazão (preto). Ainda nesse quadro (D), a série temporal de vazão foi filtrada usando um filtro do tipo lanczos com um período de corte de 30 dias. (E) Espectro local de energia utilizando ondaleta do tipo Morlet. (F) Espectro de energia da ondaleta integrado no tempo. A linha pontilhada representa 95% de confiança.	75
5.4	Séries temporais de nível de água na LM. Os pontos P1, P2 e P3 estão localizados no Canal do Sangradouro no norte, região central e no Porto de Santa Izabel no sul da LM.	77
5.5	Padrão sazonal de ventos que atua sobre a área de estudo durante o período de 2000 à 20004. Rosa dos ventos durante a primavera (a), verão (b), outono (c) e inverno (d).	79
5.6	Anomalias sazonais do nível de água da LM considerando o período de 2000 à 2004. As cores em vermelho indicam que o nível de água acima do nível médio sazonal, enquanto que a cor azul mostra os níveis abaixo da média sazonal. A elevação da superfície da água durante a primavera (a), verão (b), outono (c) e inverno (d).	80

5.7	Elevação da superfície livre calculada pelo modelo para o máximo vento (a) nordeste e (b) sudoeste do período simulado. A escala de cor mostra a elevação do nível de água e os vetores mostram a direção da atuação dos ventos.	82
5.8	Velocidade de corrente média sazonal entre todo o período de simulação. A velocidade residual (A), verão (B), outono (C), inverno (D) e primavera (E).	83
5.9	Detalhe da descarga e do nível da LM. Os círculos em azul mostram os eventos selecionados para a análise. A linha preta sólida é a descarga dos rios (Jaguarão + Tacuari + Cebollati) obtidas da Agência Nacional de Águas e em vermelho é o nível de água calculado para o ponto P1, que é indicado na Fig.5.8A.	86
5.10	Eventos (E1 e E2 - Fig.5.9) com baixa descarga e ventos de nordeste (Fig.(a) e Fig.(b)) e sudoeste (Fig.(c) e Fig.(d)). Os quadros da esquerda mostram as configuração dos ventos (vetores) e da elevação do nível de água (cores) durante os eventos. Os da direita mostram a velocidade de corrente (cores) e sua direção (vetores).	87
5.11	Eventos (E3 e E4 - Fig.5.9) com alta descarga e ventos de nordeste (Fig.(a) e Fig.(b)) e sudoeste (Fig.(c) e Fig.(d)). Os quadros da esquerda mostram as configuração dos ventos (vetores) e da elevação do nível de água (cores) durante os eventos. Os da direita mostram a velocidade de corrente (cores) e sua direção (vetores).	88
5.12	Resultados morfodinâmicos da Lagoa Mirim: (a) Tensão de cisalhamento com o fundo em escala de cores e vetores do padrão residual de correntes; (b) Porcentagem de areia muito fina e de silte muito fino (c); (d) evolução depois de 5 anos de simulação. . . .	92
5.13	(A) Vazão dos rios, (B) velocidade dos ventos, (C-E) tensão de cisalhamento nos pontos P1, P2 e P3 na Fig.5.12a.	93
5.14	Perfis de frações sedimentares ao longo dos transectos T1 a T4. T1 tem sentido sul-norte e os demais oeste-leste.	95
5.15	Evolução do fundo nos pontos P1, P2 e P3 na Fig.5.12a.	98
5.16	Resultados das mudanças batimétricas computadas pelo NESTOR para o Canal do Sangradouro (CS) para todo os cenários analisados.	101
5.17	Resultados das mudanças batimétricas computadas pelo NESTOR para o Canal de Santa Vitória do Palmar (CSVP) para todo os cenários investigados.	102
5.18	Diferenças na evolução morfológica após 5 anos de simulação entre o cenário de referência (Dr30D300) com os demais para CS.	103
5.19	Diferenças na evolução morfológica após 5 anos de simulação entre o cenário de referência (Dr30D300) com os demais para CSVP.	106

LISTA DE TABELAS

2.1	Tabela 2.1 – Comprimento de hidrovias navegáveis por país (Agency, 2009).	20
2.2	Regiões hidrográficas e respectivas hidrovias. Fonte: (CNT, 2013).	21
4.1	Configuração adotadas para o TELEMAC-2D.	46
4.2	Configuração adotadas no SISYPHE.	55
4.3	Diferença entre as malhas.	63
4.4	Testes estatísticos utilizados para avaliar a performance do modelo hidrodinâmico. Onde, n é o tamanho da amostra analisada, obs e mod são os dados observados e modelados, obs_{mean} e mod_{mean} são suas médias.	65
4.5	Validação do modelo hidrodinâmico.	67
4.6	Configurações dos cenários de dragagem e despejo.	68
5.1	Resumo das simulações de dragagem e despejo com o NESTOR.	100
5.2	Diferenças entre as variáveis hidro-morfodinâmicas de todos os cenários no CS. . . .	104
5.3	Diferenças entre as variáveis hidro-morfodinâmicas de todos os cenários modelados no CSVP.	107

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Gregos

ϵ	Coeficientes de dissipação turbulenta ($m^2.s^{-3}$).
λ	porosidade do leito (adimensional).
$\vec{\nabla}$	Operador gradiente.
μ	micro.
τ_*	Tensão crítica de Shields (adimensional).
τ_b	Tensão de cisalhamento resultante ($N.m^{-2}$).
τ_{ce}	Tensão de cisalhamento na mistura de areia-lama ($N.m^{-2}$).
τ_x	Tensão de cisalhamento na direção x ($N.m^{-2}$).
τ_y	Tensão de cisalhamento na direção y ($N.m^{-2}$).
Θ_c	Número de Shields (adimensional).
ν	Coeficiente de viscosidade cinemática do fluido ($m^2.s^{-1}$).
E_1	Fluxo de erosão da areia ($kg.m^{-2}.s^{-1}$).
E_2	Fluxo de erosão de lama ($kg.m^{-2}.s^{-1}$).
f_1	Porcentagem de areia na camada ativa.
f_2	Porcentagem de lama na camada ativa.
k	Constante de von Karman (adimensional).
R	Número de Rouse (adimensional).
u_*	Velocidade de fricção ($m.s^{-1}$).
u_{mud}^{cr}	velocidade de deposição de lama ($m.s^{-1}$).
w_{s1}	Velocidade de sedimentação da areia ($m.s^{-1}$).
div	Operador divergente.

Símbolos Romanos

$\bar{u}$	Velocidade de corrente na direção x ($m.s^{-1}$).
$\bar{v}$	Velocidade de corrente na direção y ($m.s^{-1}$).
ρ	Massa específica da água ($kg.m^{-3}$).
ρ_s	Massa específica do sedimento ($kg.m^{-3}$).
C_d	Coeficientes de fricção com o fundo (adimensional).
CO_2	Dióxido de carbono.
D	fluxo de deposição ($m.s^{-1}$).
d_{50}	Diâmetro médio do grão (μm).
E	fluxo de erosão ($m.s^{-1}$).
Fr_*	Número de Froude (adimensional).

g	Aceleração gravitacional ($m.s^{-2}$).
h	Elevação do nível da água (m).
h_{crit}	Profundidade crítica do leito no modelo NESTOR (m).
h_{drag}	Profundidade de dragagem do leito no modelo NESTOR (m).
h_o	Profundidade inicial do leito no modelo NESTOR (m).
m	Coefficiente de Manning ($s.m^{-1/3}$).
mod	dados modelados.
mod_{mean}	média dos dados modelados.
mod_{var}	variância dos dados modelados.
obs	dados coletados em campo.
obs_{mean}	média dos dados coletados.
obs_{var}	variância dos dados coletados.
Q_b	Transporte sedimentar por carga de fundo ($m^2.s^{-1}$).
Q_s	Transporte sedimentar por carga em suspensão ($m^2.s^{-1}$).
Q_t	Transporte sedimentar total ($m^2.s^{-1}$).
Q_{bx}	transporte por carga de fundo na direção x ($m^2.s^{-1}$).
Q_{by}	transporte por carga de fundo na direção y ($m^2.s^{-1}$).
r	Coefficiente de correlação de Pearson.
Re_*	Número de Reynolds (adimensional).
S_h	Fonte ou sumidouro do fluido ($m.s^{-1}$).
S_T	Fonte ou sumidouro do traçador ($g.l^{-1}/s$).
S_x	Termo fonte ou sumidouro em equação dinâmica na direção x ($m.s^{-2}$).
S_y	Termo fonte ou sumidouro em equação dinâmica na direção y ($m.s^{-2}$).
v_T	Coefficientes de difusão do traçador ($m.s^{-2}$).
v_t	Coefficientes de difusão da quantidade de movimento ($m.s^{-2}$).
Z_f	elevação do fundo (m).
k	Energia cinética turbulenta ($m^2.s^{-2}$).
n	número de dados.
T	Temperatura (C).
t	Tempo (s).
Z	Elevação da superfície livre (m).

LISTA DE ABREVIATURAS

ANTAQ	Agência Nacional de Transportes Aquaviários
BNDS	Banco Nacional do Desenvolvimento
BIAS	Erro médio ou viés
CIA	Agência Central de Inteligência
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CS	Canal do Sangradouro
CSG	Canal São Gonçalo
CSVP	Canal de Santa Vitória do Palmar
DHN	Diretoria de Hidrografia e Navegação
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EDF	<i>Électricité de France</i>
EN	El Niño
EUA	Estados Unidos da América
HLM	Hidrovia da Lagoa Mirim
HM	Hidrovia do Mercosul
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IC	Índice de concordância de Willmott
LP	Lagoa dos Patos
LM	Lagoa Mirim
LN	La Niña
MAE	Erro médio absoluto
MERCOSUL	Mercado Comum do Sul
MSE	Erro quadrático médio
PIB	Produto Interno Bruto
RMSE	Raiz do erro quadrático médio
SI	Porto de Santa Izabel
SVP	Porto de Santa Vitória do Palmar
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
tku	Tonelada-quilômetro útil
UE	União Europeia

1. INTRODUÇÃO

No mundo atual, moderno e globalizado, o desempenho econômico de um país depende de redes eficientes de distribuição de bens, nas quais os portos e hidrovias desempenham um papel de destaque (Tull e Reveley, 2008; Talley, 2009). Além disso, a competitividade dos produtos brasileiros no mercado global depende da rapidez, confiabilidade e custos dos serviços portuários com responsabilidade ambiental devidamente garantida (Rocha et al., 2018).

Em um estudo desenvolvido para a Hidrovia do Paraguai - Paraná, a UFPR/ITTI (2014) comparou os custos com transporte Rodoviário, Ferroviário e Hidroviário de cinco países da América Latina (Argentina, Bolívia, Brasil, Paraguai e Uruguai). Nesse trabalho, foi relatado que independente do tipo de carga a ser transportada e a distância percorrida o modal rodoviário é o mais oneroso. Também, foi observado que o modal ferroviário representa, aproximadamente, a metade do custo do rodoviário, enquanto que o custo do hidroviário é cinco vezes menor em relação ao rodoviário.

De acordo com Milanković et al. (2018), o uso das hidrovias na região do rio Danube na Sérvia possui um menor custo para o transporte de mercadorias quando comparados com os modais terrestres. Nessa região, o valor de transporte de uma tonelada-quilômetro em uma barça é três vezes menor do que a movimentação por ferrovias, e até trinta e sete vezes mais econômico em comparação com a mobilidade por caminhões (Güler et al., 2012). Nesse sentido, a *American Waterways Operator* (2013) afirma que esse tipo de transporte é particularmente eficiente em termos energéticos, isso porque o seu consumo por tonelada-quilômetro de mercadorias movimentadas corresponde a um sexto do consumo de transporte rodoviário e metade do consumo do modal ferroviário (Lowe, 2005).

Essa diferença de custo entre os modais é associada à capacidade de carga, pois, uma barça do tipo Mississípi geralmente transporta 1.750 toneladas, o que equivale à capacidade de 16 vagões ou 70 reboques de caminhão (Protopapas et al., 2013). Vale destacar, que um navio rebocador normalmente empurra de 9 a 15 barças de uma só vez, desse modo, o uso desse tipo de modal pode evitar mais de 51 milhões de viagens de caminhão por ano (*American Society of Civil Engineers*, 2013). Segundo Hao et al. (2015), essa economia faz com que a navegação interior seja o meio mais apropriado na busca de uma estratégia de desenvolvimento sustentável, tendo em vista que o setor de transporte global consome cerca de 45% do total de energia produzida no mundo.

Analogamente, Oztanriseven e Nachtmann (2017) afirmaram que o transporte hidroviário não é vantajoso apenas economicamente, mas também fornece outros benefícios, como ser livre de congestionamento, ser seguro, confiável, ser socialmente aceitável, eficiente energeticamente e

ambientalmente, especialmente para a movimentação de cargas pesadas e volumosas por longas distâncias (Wang e Schonfeld, 2005). Seu ruído e emissões de CO_2 são modestos, os custos externos totais da navegação interior (em termos de acidentes, congestionamento, emissões de ruído, poluição atmosférica e outros impactos ambientais) são sete vezes inferiores aos do transporte rodoviário (Lowe, 2005; Mihic et al., 2011). Nesse sentido, a CNT (2013) ressalta que o fator de emissão de CO_2 (medido em gCO_2/tku - gramas de Dióxido de Carbono por tonelada-quilômetro útil) da navegação interior chega ser 80% menor do que o rodoviário, conforme pode-se observar na Fig. 1.1.

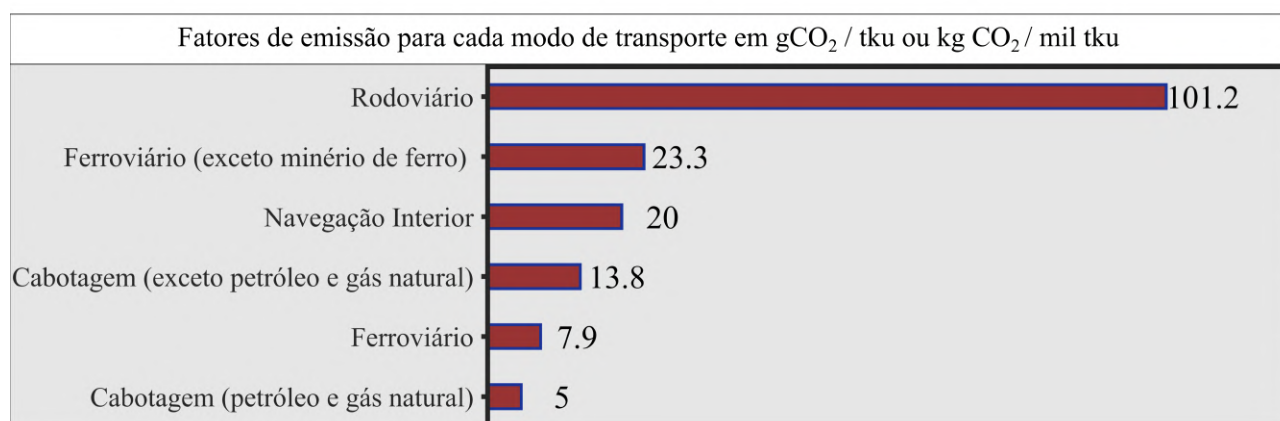


Figura 1.1 – Fatores de emissão para cada modal de transporte, medido em gCO_2/tku ou $kgCO_2/mil tku$. Fonte (CNT, 2013).

1.1. Justificativa

Localizada entre o extremo sul do Rio Grande do Sul e o Uruguai, a Lagoa Mirim (LM) é uma lagoa costeira bi-nacional que faz parte da Hidrovia do Mercosul (HM). A HM tem o objetivo de interligar a Hidrovia da Lagoa Mirim (HLM) (Fig.1.2) com a Laguna dos Patos (LP) e o Superporto de Rio Grande, por onde poderiam ser exportados significativos volumes da produção uruguaia, principalmente madeira e arroz, transformando-se em um corredor natural de exportação do MERCOSUL (Azambuja, 2005).

De acordo com o Decreto legislativo nº 546, de 2002, uma vez implantado, esse sistema viário fluvio-lacustre ampliará o comércio entre o Brasil e o Uruguai. Logo, proporcionará que os produtos uruguaiois cheguem até o porto de Rio Grande com saída através da cabotagem para a costa brasileira, ou mesmo para navegações de longo curso em mercados internacionais. Desse modo, trazendo reflexos positivos para o desenvolvimento da região da LM e de sua área de influência.

Segundo o DNIT (2014) a capacidade de transporte da HM encontra-se subutilizada devido à expansão da malha rodoviária, que vem ocorrendo desde a década de 1960. Nesse interim, atualmente se vem discutindo a reabertura da HLM, que tem o propósito de ampliar a capacidade e reduzir os custos com transporte na região. Entretanto, para atingir esse objetivo, há a necessidade da implantação de obras de dragagem e sinalização náutica dentro da LM, além do estabelecimento de melhorias na infra-estrutura dos portos (DNIT, 2014). De acordo com estudos prévios realizados pelo IBGE (2010), a reativação do transporte através da HLM poderá causar a redução de até 60% no custo com a movimentação de mercadorias nessa região.

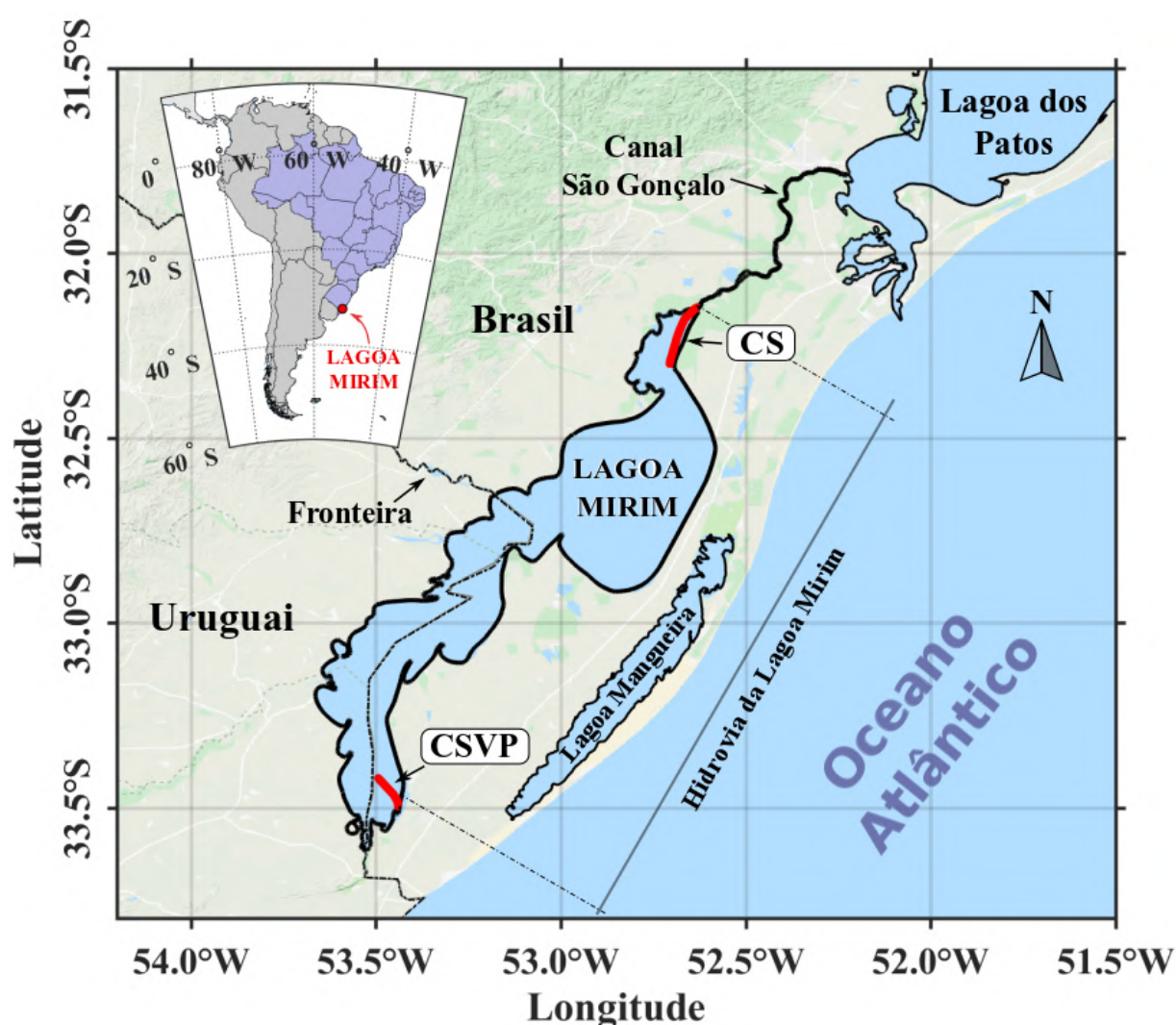


Figura 1.2 – Mapa de localização da Hidrovia da Lagoa Mirim (HLM). Os canais de dragagem estão representados pela cor vermelha. Ao norte da HLM se encontra o Canal do Sangradouro (CS) e ao sul o Canal de Santa Vitória do Palmar (CSVP).

Atualmente há trechos críticos que necessitam de dragagem de manutenção para a reativação

da navegação na HLM. Desse modo, deverá ser removido um volume de 529.000 m³ ao longo de 17 km do Canal do Sangradouro (CS) e 231.000 m³ em 10 km do Canal de Acesso ao Porto de Santa Vitória Palmar (CSVP) (DNIT, 2014).

As operações de dragagem estão entre as mais importantes obras hidroviárias e se desenvolvem regularmente em zonas imersas, marítimas, lagunares e fluviais, em todo o mundo (Du e Li, 2010). Seus canais requerem frequentes dragagens, seja para a criação ou alargamento nos canais de acesso a portos, para uma ampliação das infraestruturas ou até para manter uma profundidade operacional (Bray et al., 1997; Antipov et al., 2006).

Em todo o mundo, essas operações impulsionam o transporte hidroviário, mas também enfrentam sérios desafios ambientais. Além disso, como qualquer outra atividade potencialmente que apresenta impactos ambientais, as atividades de dragagem dependem de licenciamento ambiental prévio para sua mobilização e operação, consequentemente, estão sujeitas a avaliações de impacto ambiental pelas instituições competentes (Rocha et al., 2018).

O aprofundamento de canais de navegação em ambientes lagunares pode resultar em impactos diversos nos padrões de circulação e gradientes de salinidade (Hu e Ding, 2009). Dentre esses possíveis impactos e suas consequências, pode-se destacar: intensificação ou redução de correntes de maré (Hu e Ding, 2009), aumento de concentração de sedimentos sem suspensão (Jiang et al., 2013), diminuição dos tempos de renovação das águas (Malhadas et al., 2009; Jeyar et al., 2015), a diminuição da qualidade da água (Teatini et al., 2017), perda de heterogeneidade do ecossistema (García-Oliva et al., 2018) e mudanças nos padrões de erosão/deposição (Luan et al., 2018).

Nesse sentido, faz-se necessária a realização de estudos de previsão que demonstrem a influência das obras na dinâmica da região considerada em termos de impactos ambientais e determinação do tempo em que uma nova dragagem será inevitável (Paarlberg et al., 2015). Desse modo, a utilização da modelagem numérica tem ganhado espaço, tendo um grande potencial para estudos desse caráter.

A vantagem de utilizar-se esse método é que ele pode se adaptar facilmente a diferentes domínios, diferente de modelos físicos, que são tipicamente construídos para representar condições específicas de um determinado local (Winterwerp e Wang, 2013). Ademais, os modelos numéricos são ferramentas eficazes, rápidas e de baixo custo para validar as hipóteses que são levantadas acerca dos potenciais impactos e podem ajudar a otimizar ou corrigir projetos, antes e após de sua construção (Hu e Ding, 2009).

Diante do exposto, o trabalho está sendo desenvolvido com o intuito de modelar numericamente os processos hidro-morfodinâmicos na Lagoa Mirim, utilizando a suíte de modelagem Open TELEMAC-

MASCARET e visando estudar os padrões de circulação e de transporte sedimentar nos cenários pré-dragagem e pós-dragagem, auxiliando assim no gerenciamento dos canais de navegação com informações que poderão ter impactos na redução de custos e prevenção de possíveis danos ao meio ambiente. Para isso, foram definidos objetivos descritos a seguir.

1.2. Objetivos

Objetivo geral

O objetivo desse trabalho é identificar e caracterizar os processos que controlam o transporte de sedimentos na Lagoa Mirim e prever impactos de dragagem através de modelagem numérica.

Objetivos específicos

- Caracterizar a hidrodinâmica da Lagoa Mirim;
- Quantificar as mudanças morfológicas espaciais e temporais do complexo Lagoa Mirim;
- Simular diferentes cenários de dragagem e despejo de material para avaliar uma melhor estratégia de gerenciamento dos sedimentos.

1.3. Estrutura da dissertação

Este trabalho está dividido em 8 capítulos, de forma que, o primeiro contempla esta introdução, a justificativa e os objetivos dessa pesquisa. O segundo traz uma revisão bibliográfica de alguns conceitos que serão discutidos no decorrer do texto, bem como um estado da arte sobre tipos e equipamentos de dragagem, focando na utilização de modelos hidro-morfodinâmicos aplicados a essas obras no Brasil e em outros países do mundo, apontando diferentes abordagens e mostrando possibilidades em diferentes contextos.

O terceiro capítulo apresenta a área de estudo, sua importância econômica para o estado e descreve as características físicas do local. Ademais, no quarto capítulo é apresentada a metodologia que será utilizada para executar os objetivos propostos no primeiro capítulo e traz os resultados da validação do modelo hidrodinâmico. No quinto capítulo os resultados e discussões relacionados ao processos hidrodinâmicos, de transporte de sedimentos e de operações de dragagem são apresentados. No sexto, é apontado as principais conclusões do estudo. No sétimo, são apresentadas algumas limitações desse estudo e sugestões para trabalhos futuros. Por último, encontra-se o referencial bibliográfico.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo é apresentada a revisão de literatura, conceituando e definindo alguns termos recorrentes no texto, tratando do panorama hidroviário mundial e nacional, conceituando também os tipos de operações e de equipamentos utilizados em dragagem, priorizando no estado da arte a temática em modelagem hidro-morfodinâmica aplicada aos estudos dessas atividades. Por fim, a seção 2.5 apresenta alguns trabalhos recentes relacionados a esse tema no Brasil e no mundo.

2.1. Panorama hidroviário mundial

Em todo o mundo, as vias navegáveis representam um dos mais importantes meios de transporte disponíveis, ficando atrás apenas dos modais rodoviários e ferroviários. De acordo com a Agency (2009) existem mais de 600.000 km de vias navegáveis no mundo, dentre os países que se sobressaem, pode-se destacar a China, seguida da Rússia, Brasil e os Estados Unidos da América (EUA) (Lambert, 2010).

Com é possível observar na Tabela 2.1, a China atualmente é o país que possui o maior comprimento de vias navegáveis no mundo, chegando a mais de 110.000 km. Sua rede possui mais de 50.000 canais naturais e dispõe de cerca de 900 lagos, que possuem uma área de drenagem de mais de 100.000 km^2 . Seus três principais cursos d'água são os rios Yangtze (6.300 km), Huang He (5.464 km) e Zhujiang (4.350 km) (Lambert, 2010; Wiegman e Konings, 2016). Esses recursos hídricos fornecem enorme apoio para o desenvolvimento econômico ao longo de suas áreas de influência, de modo que, o produto interno bruto (PIB) total das sete províncias e de duas cidades situadas no corredor do Rio Yangtze cobrem cerca de 40% do PIB total Chinês, fazendo com que esse canal navegável ocupe a primeira colocação entre todas as mais importantes vias navegáveis interiores do mundo (Peng et al., 2010).

O comprimento total combinado da rede hidroviária europeia, mede cerca de 52.000 km, de modo que, cerca de 50% desse total é composto pelas malhas da França (14.900 km), Alemanha (7.500 km), Países Baixos (5.000 km) e Bélgica (1.570 km) (Agency, 2009). O núcleo fluvial europeu consiste nos dois maiores rios: o Danúbio, que percorre uma distância de 2.850 km da Alemanha, passando pela Áustria, Hungria, Sérvia e Romênia até o Mar Negro, e o Reno (1.300 km), conectando Suíça e uma importante região industrial da Alemanha com o porto de Roterdã, na Holanda. Essas hidrovias são as principais áreas econômicas da Europa acessíveis por vias navegáveis (Wiegman e Konings, 2016).

Apesar das condições naturais favoráveis, a parcela de participação desse modal cobre apenas

Tabela 2.1 – Comprimento de hidrovias navegáveis por país (Agency, 2009).

País	Comprimento navegável (km)	Participação Global (%)
China	110.000	18
Rússia	102.000	16
Brasil	50.000	8
EUA	41.009	7
Indonésia	21.579	3
Colômbia	18.000	3
Vietnã	17.702	3
Congo	15.000	2
Índia	14.500	2
Burma	12.800	2
Argentina	11.000	2
Papua-Nova Guiné	11.000	2
Bolívia	10.000	2
Peru	8.808	1
Nigéria	8.600	1
França	8.501	1
Bangladesh	8.370	1
Finlândia	7.842	1
Alemanha	7.467	1
Malásia	7.200	1
Outros	131.269	21
Total mundial	622.647	100
Total Europa	52.332	8

5,6% do total do transporte de mercadorias da União Europeia (UE) (European Commission, 2011). Entretanto, países como a Holanda se destacam por ser a nação que mais utiliza o modal hidroviário desse continente, possuindo quase que dois quintos (39,1%) de toda as suas mercadorias movimentadas através da navegação interior (Agency, 2009).

Outra potência mundial em relação à navegação por hidrovias são os EUA. Sua malha contém cerca de 41.000 km de rios navegáveis, dos quais, menos da metade são comercialmente significativos

(Agency, 2009). Dentre as vias norte americanas mais expressivas, podemos destacar os rios Mississípi e Ohio com a extensão total de 3.780 km e 1.580 km, respectivamente (Lambert, 2010). Embora sua rede seja menos extensa quando comparamos com as de outros países, ela pode usufruir das maiores unidades de transporte do mundo, isto é, as maiores barcaças empurradas por rebocadores (Wiegman e Konings, 2016). De acordo com uma pesquisa sobre o fluxo de commodities realizada pelo Office of the Secretary of Transportation (2018), as hidrovias navegáveis representaram 9% do frete total em tonelada-quilômetro nos EUA.

2.2. Panorama hidroviário brasileiro

O Brasil é um país de dimensões continentais que possui uma grande rede de rios navegáveis distribuídas em diversas bacias hidrográficas. Essa imensa malha fluvial está distribuída por doze regiões (Tab. 2.2) que abrangem todo o país e também se conectam a diversos países da América do Sul como Bolívia, Colômbia, Argentina, Paraguai e Uruguai (CNT, 2013).

Tabela 2.2 – Regiões hidrográficas e respectivas hidrovias. Fonte: (CNT, 2013).

Regiões hidrográficas	Rios	Extensão (km)
Amazônica	Amazonas, Solimões, Branco, Madeira, Tapajós, Teles, Pires e Guaporé	19.024
Tocantins Araguaia	Tocantins, Araguaia, das Mortes e Capim	3.500
Atlântico NE Ocidental	Mearim, Pindaré e Itapicurú	2.100
Parnaíba	Paranaíba e Balsas	2.520
Atlântico NE Oriental	-	-
São Francisco	São Francisco, Grande e Corrente	4.100
Atlântico Leste	Parnaíba do Sul, Doce e Jequitinhonha	1.094
Atlântico Sudeste	-	-
Paraná	Tietê, Piracicaba, Grande, Ivaí e Ivinheima	4.800
Paraguai	Paraguai, Cuiabá, Miranda, São Lourenço, Taquari e Jaurú	3.095
Uruguai	Uruguai e Ibicuí	1.200
Atlântico Sul	Jacuí, Taquari, Lagoa dos Patos e Lagoa Mirim	1.309
Total		42.742

Segundo a (CNT, 2013), a participação do modal aquaviário no Brasil, considerando hidrovias

interiores e cabotagem, é de 13% do total, de modo que a navegação interior é responsável por 5% do total nacional. De acordo com o levantamento das vias economicamente navegadas, realizado pela ANTAQ (2016), as principais hidrovias do país são: Amazônica (17.651 km), Tocantins-Araguaia (1.360 km), Paraná-Tietê (1.359 km), Paraguai (591 km), São Francisco (576 km) e Sul (500 km).

Apesar da vocação natural para a navegação, Santos et al. (2004) afirma que o sistema hidroviário nacional está sendo subutilizando, pois dos 42.742 km de vias navegáveis existentes, apenas cerca de 50% estão economicamente ativos. Porém, ainda que não tenham seu potencial completamente explorado, essa forma de transporte é um dos modais logísticos de maior destaque no país, principalmente nos estados do Norte, entretanto poderia ser melhor explorado nas demais regiões (ANTAQ, 2016).

Segundo Wiegmans e Konings (2016) 80% das hidrovias brasileiras estão localizadas na região amazônica, especificamente no complexo Solimões-Amazonas. O mesmo autor afirma que esse é o principal corredor hidroviário nacional, tanto em volume de cargas, quanto em distância percorrida, correspondendo a 74% do indicador tku hidroviário total no país em 2013 (CNT, 2013). Segundo o Banco Nacional do Desenvolvimento (BNDS), esse modal respondeu por 83,8 milhões de toneladas de carga transportada no ano de 2016 (ANTAQ, 2016).

2.3. Dragagem

A dragagem é, por definição, a escavação ou remoção de solo do fundo de rios, lagos e outros corpos d'água, geralmente com o propósito de aprofundá-los ou limpá-los (Antipov et al., 2006; Du e Li, 2010). Essa técnica é executada por meio de equipamentos denominados dragas, que são embarcações ou plataformas flutuantes equipados com os dispositivos necessários para a remoção do solo e derrocamento de pedras (Bray et al., 1997).

As principais etapas dessas operações são a escavação, o transporte e o descarte ou tratamento do material (Fig. 2.1), sendo essas repetidas sucessivamente até que a quantidade ou profundidade de projeto seja alcançada (Thorn, 1975; Bray et al., 1997). O processo de escavação se inicia com a escavação de sedimentos em um local com um cortador hidráulico ou mecânico (Klein, 1998; Antipov et al., 2006). Desse modo, os sedimentos dragados são transferidos para barcas, cisternas ou podem ser transportados até o local de descarte por tubulações de recalque (Highley et al., 2007; Van Oostrum, 1992) e finalmente, os sedimentos são evacuados em um local definido em projeto ou legislação (Manap e Voulvoulis, 2015).

Suedel et al. (2008) afirmaram que nas últimas décadas a demanda por essas atividades tem

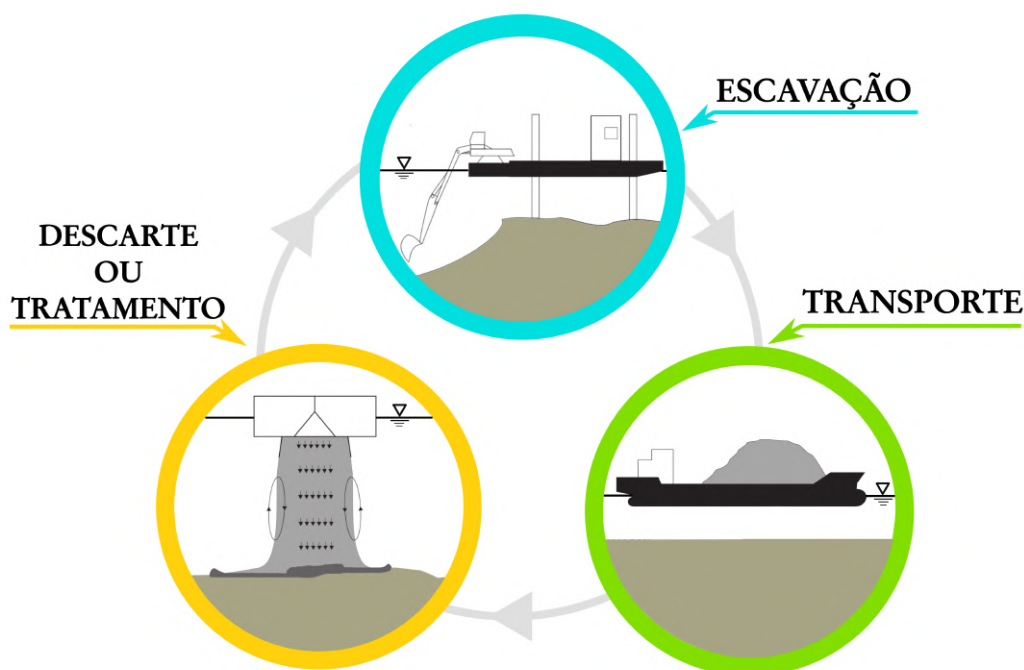


Figura 2.1 – Etapas da dragagem, modificada de (Highley et al., 2007; Manap e Voulvoulis, 2015).

crescido cada vez mais pela necessidade de criação e manutenção de infraestruturas de transporte como: vias navegáveis, portos e canais fluviais. Essa intensificação é consequência do crescimento econômico e comercial dos países, pois é necessário que haja canais cada vez mais profundos, para que embarcações, cada vez maiores, possam circular e atender as demandas (Shao et al., 2015; Feola et al., 2016; Caballero et al., 2018).

Historicamente, a medida que a indústria da dragagem se desenvolveu, as tecnologias avançaram e atualmente existem diferentes tipos de equipamentos e um amplo conjunto de técnicas disponíveis para serem utilizados em diferentes aplicações (Vlasbom, 2005; Manap e Voulvoulis, 2015). Desse modo, para entender um pouco melhor a aplicabilidade dessas operações, é necessário ter um entendimento completo dos seus diferentes tipos. Sendo assim, pode-se classificar essa atividade em quatro categorias: dragagem de implantação e aprofundamento; dragagem de manutenção; dragagem de remediação ou ambiental e dragagem de mineração. A seguir, uma breve descrição das principais características e aplicações dessas atividades será realizada.

2.3.1. Dragagem de implantação e aprofundamento

O método de implantação e aprofundamento é também conhecido como *capital dredging*, essa operação envolve a criação de novas instalações ou melhoramento de antigas infraestruturas. Podemos citar alguns exemplos desse tipo de operação: criação ou ampliação de bacias portuárias, canais de navegação, bacias de evolução, criação de novas terras (aterros) para fins industriais, residenciais ou recreativos, ou mesmo obras hidráulicas que alterem o curso natural de qualquer corpo hídrico em áreas não dragadas anteriormente (Klein, 1998; van't Hoff e van der Kolff, 2012).

Apesar de ser uma atividade essencial para ampliação da capacidade de transporte de mercadorias, essa prática traz efeitos negativos ao ambiente, por exemplo a destruição de *habitats* naturais pela escavação e o descarte em zonas biologicamente sensíveis, tais como recifes de corais e algas marinhas (Erftemeijer e Lewis III, 2006; Erftemeijer et al., 2012). Todavia, os sedimentos oriundos dessa aplicação podem ser utilizados para a criação de novas zonas úmidas, planícies de maré, criação de novas terras, proteção costeira contra erosão e inundação de áreas de seu baixo teor de contaminantes (Bray, 2004). Além disso, a alteração das profundidades modificam a dinâmica fluvial, podendo acelerar ou amortecer as ondas de cheias, alterando consideravelmente as épocas e condições de inundações (Paarlberg et al., 2015).

2.3.2. Dragagem de manutenção

Consiste na remoção do material originado a partir de assoreamento em leito de canais, o que geralmente ocorre naturalmente. Portanto, essa prática repetitiva e rotineira nos portos e canais de navegação, ela tem o objetivo de manter a profundidade de projeto dos canais, quando a lâmina d'água é constantemente reduzida pelo acúmulo de sedimentos (Bray et al., 1997).

De acordo com Crowe et al. (2010), os impactos ambientais causados por essa atividade não estão diretamente relacionados com a retirada de material do fundo, uma vez que essas operações ocorrem em locais já modificados pelo homem. No entanto, essa prática causa a ressuspensão de uma grande quantidade de sedimentos que, possivelmente, induz a dispersão de plumas de materiais contaminados e, conseqüentemente, elevam o nível de turbidez da água ocasionando danos à fauna e à flora de ambientes aquáticos (Leeuw et al., 2010). Entretanto, esses problemas podem ser minimizados por meio da escolha adequada do equipamento e dos procedimentos de dragagem a serem adotados.

2.3.3. Dragagem de remediação ou ambiental

Segundo Blazquez et al. (2001) esse tipo de operação visa a remoção precisa de sedimentos contaminados em um corpo hídrico, os quais podem trazer danos ao ambiente e/ou à saúde humana. Para isso, são utilizadas técnicas e instrumentos que minimizam o risco da dispersão desses contaminantes na coluna d'água, como por exemplo, a implantação de cortinas para conter a dispersão dos sedimentos, as velocidades de bombeamento são reduzidas e há a minimização do *overflow* (Bray, 2004).

Quando comparada à dragagem de implantação e manutenção, esse tipo de operação é geralmente de menor escala, isso quer dizer que as quantidades de material removido são menores. Entretanto, possuem grande importância devido as suas implicações ambientais de longa duração e demandam custos e cuidados adicionais. De acordo com Hayes (1992); Keillor (1993), a produtividade e a economia são conhecidas por desempenhar um papel secundário na dragagem ambiental, visto que é uma atividade que requer a adoção de técnicas para evitar impactos ambientais.

A aplicação dessa técnica tem o objetivo de remediar uma situação adversa existente, desse modo o principal efeito ambiental é necessariamente positivo, desde que a dragagem seja feita cuidadosamente e não prejudique de forma significativa o ambiente (Antipov et al., 2006; Manap e Voulvoulis, 2015; Staniszewska et al., 2017). Um pré-requisito para um projeto de remediação bem-sucedido é a remoção da fonte da contaminação antes do início de qualquer atividade corretiva (Bray et al., 1997).

2.3.4. Dragagem de mineração

Argilas, areias e cascalhos são materiais essenciais para a indústria da construção civil e estão presentes em quase todos os projetos de edifícios, pontes, estradas, portos e aeroportos (Nielsen, 1998). Consequentemente, por desempenhar um papel essencial para o desenvolvimento da sociedade, cada vez está maior a demanda por esses componentes para atender às necessidades de criação de novas construções, bem como a reabilitação de infraestruturas envelhecidas (Erftemeijer e Lewis III, 2006). Nesse sentido, a dragagem de mineração tem o objetivo de explorar minerais que possuem algum valor econômico do leito de lagos, rios e córregos, uma vez que, esses ambientes são suas principais fontes (Alfredini e Arasaki, 2014; Alpers et al., 2005). Ademais, a dragagem de mineração também podem ser executadas para extração de ouro e diamantes dos aluviões fluviais (Goes Filho, 2004).

2.4. Equipamentos de dragagem

Embora exista vários critérios para a classificação dos tipos de dragas, em geral, três grandes categorias são reconhecidas com base nos meios de escavação e operação. De acordo com Bray (2004), elas podem ser divididas como: Equipamentos Mecânicos; Hidráulicos e Pneumáticos.

Segundo Manap e Voulvoulis (2015), cada tipo de projeto requer a utilização e aplicação de um equipamento e/ou de uma técnica específica, no entanto, alguns tipos de dragas são adequadas apenas para uma faixa estreita de aplicações, enquanto que outras apresentam maior versatilidade. Além disso, certos tipos de dispositivos podem ser incapazes de executar determinadas tarefas, ou apenas executam esse trabalho com sua eficiência reduzida. Dessa forma, é importante que a escolha do método e do equipamento de dragagem seja devidamente considerada durante os estágios de projeto e planejamento, pois, esse é um elemento crucial na estimativa de custos e na eficiência de execução ou manutenção de uma infraestrutura (British Standard, 1991).

Nesse sentido, U.S. Army Corps of Engineers (1983) afirmaram que para uma correta escolha do equipamento de dragagem, deve-se levar em consideração fatores físicos com as dimensões da área de dragagem, o volume a ser removido ou despejado, a localização e distância da área de despejo ou de empréstimo. Além disso, Bray (2004) afirma que condições ambientais como nível de água, ondas, ventos, correntes e salinidade devem ser considerados para a escolha do dispositivo. Ademais, van't Hoff e van der Kolff (2012) reconhecem que deve-se levar em conta os tipos de equipamentos disponíveis, os custo de mobilização, bem como as taxa de produção, o grau de precisão e os métodos de transporte e despejo do material. Adicionalmente, Sato e Isobe (2015) destacam que o equipamento selecionado deve atender os requisitos ambientais definidas por leis ou projetos específicos.

Nos itens a seguir, apresenta-se uma breve visão dos principais tipos de equipamentos de dragagem, seus respectivos métodos de operação, funcionamento, aplicações e algumas vantagens e desvantagens, para fornecer um conhecimento básico sobre o assunto. Para descrições mais detalhadas consultar Bray et al. (1997) e Turner (1996).

2.4.1. Equipamentos mecânicos

Esse tipo de equipamento utiliza dispositivos de escavação mecânica para cortar e retirar o material, procedimento que geralmente se assemelha ao de remoção de solo terrestre (Bray, 2004; Antipov et al., 2006). Essa operação ocorre de forma descontínua e utiliza equipamentos como caçambas, escavadeiras e pás carregadeiras. A escavação é feita pela aplicação de esforços no solo de

tal forma que parte do solo é removida e retida pela caçamba.

As dragas mecânicas podem geralmente ser classificadas como Retroescavadeiras (*Backhoe Dredger*), Escavadeiras frontais (*Dipper Dredger*), Caçamba de mandíbulas (*Grab Dredger* ou *Clamshell*), Draga de alcatruzes (*Buket Landder Dredger* e Pás de arrasto (*Dragline*), ilustradas na Fig.2.2. Tais instrumentos podem ser terrestres ou flutuantes, no caso dos equipamentos que operam em terra firme, o transporte do material dragado até a área de despejo é feito através de caminhões. Quanto aos equipamentos flutuantes, a movimentação do material geralmente é feita por barcaça (batelão).

De acordo com U.S. Army Corps of Engineers (1983) a utilização de dragas mecânicas é justificada caso haja presença de detritos na área de dragagem (arames, pneus, resíduos de construções e outros), trabalhos em áreas confinadas (muros de cais, molhes e cantos), trabalhos em águas rasas, necessidade de carregar barcaças e no caso de haver presença de solos contaminados ou outras restrições.

2.4.2. Equipamentos hidráulicos

As dragas hidráulicas consistem em todo equipamento que utiliza bombas centrífugas em parte do processo de dragagem, seja ele para fornecer forças de escavação ou para realizar a movimentação desse material para o local de despejo. De um modo geral, o processo de dragagem desses equipamentos é baseado na ação erosiva do fluxo de água, o qual é bombeado para dentro da tubulação para dentro da cisterna ou para uma embarcação secundária. Essas cisternas acomodam o material que vai se consolidando no fundo, quando esse reservatório atinge seu volume máximo ocorre o processo de transbordamento, também chamado de *overflow*. Geralmente esse extravasamento de água possui uma alta carga de material em suspensão, desse modo acarretando um aumento da concentração de sedimentos suspensos no entorno da draga durante as operações.

O transporte do material até a zona de despejo pode se dar através de tubulações (*pipelines*) ou em alguns casos especiais, essas dragas bombeiam para um batelão acoplado a draga, que posteriormente é transportado até o local de despejo (Bray, 2004). De um modo geral, esses equipamentos podem ser classificados pelo seu método de escavação e os principais tipos são: Draga de sucção (*Plain suction dredger*), Draga de corte e sucção (*Cutter suction dredger*), Dragas Autotransportadoras de Arrasto (*Trailing suction hopper dredger*) e *Dustpan dredger*, como é mostrado na figura 2.3.

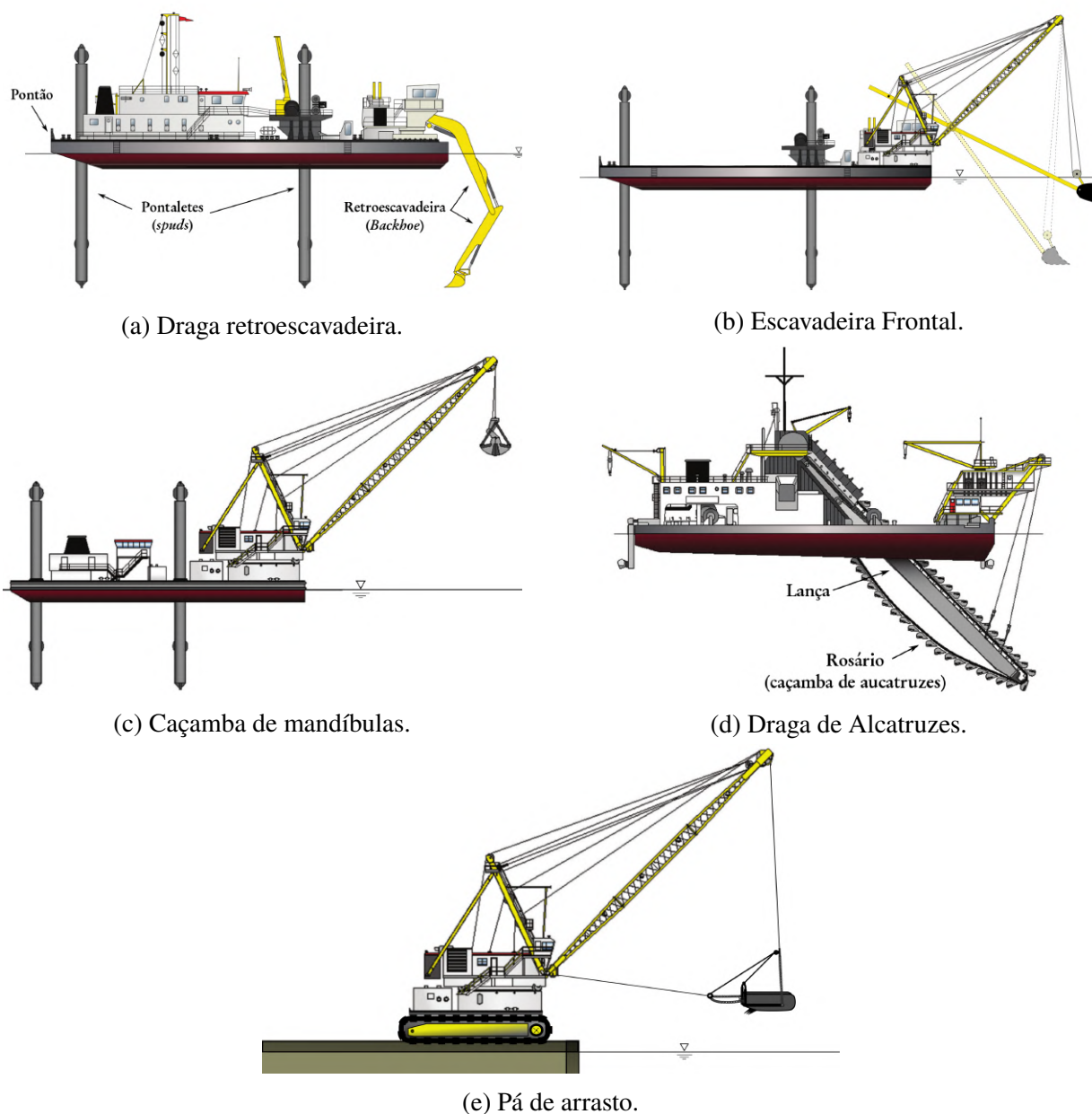


Figura 2.2 – Equipamentos mecânicos de dragagem. Modificados de van't Hoff e van der Kolff (2012).

Equipamentos pneumáticos

Além dos sistemas de dragagem mais conhecidos e utilizados no mundo, já mencionados anteriormente, existem também alternativas que são usadas apenas em casos bem específicos. Desse modo, podemos citar as dragas pneumáticas, as quais são principalmente usadas para dragagem de solos coesivos pouco consolidados. A principal aplicação da técnica por elas utilizadas é a remoção de solo contaminado e o trabalho de escavação em grandes profundidades, podendo efetuar dragagens

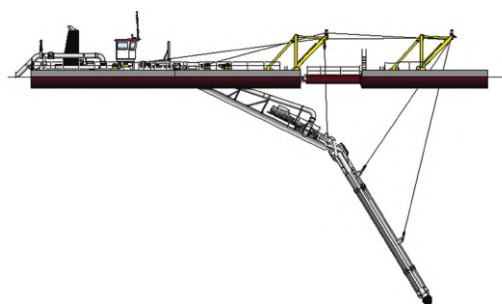
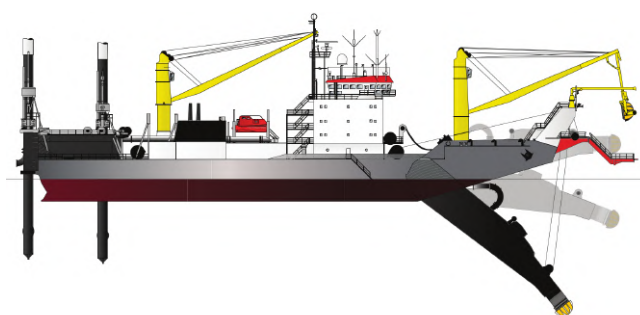
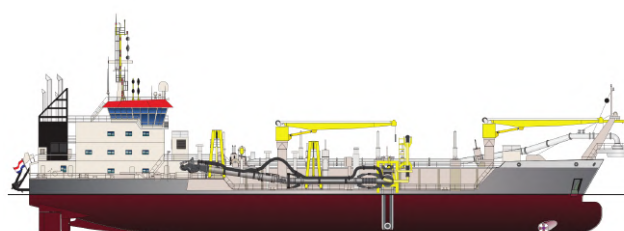
(a) Draga de sucção (*Suction Dredger*).(b) Draga de corte e sucção (*Cutter suction dredger*).(c) Dragas Autotransportadoras de Arrasto (*Trailing suction hopper dredger*).

Figura 2.3 – Equipamentos hidráulicos de dragagem. Modificados de van't Hoff e van der Kolff (2012).

ambientais praticamente sem turbidez de contaminantes (Staniszewska et al., 2017).

O sistema é composto por três cilindros, dois tubos de suprimento/escape de ar comprimido, um compressor e uma unidade de entrega. Além disso, também é baseado em princípios de bombeamento hidrostático, este trata-se de uma pressão diferencial induzida em um cilindro por um vácuo e pela cabeça hidráulica externa, criando um influxo de sedimentos macios no cilindro (Fig. 2.4 Estágio 1). Quando o cilindro é enchido, a válvula de entrada é fechada e o ar comprimido é bombeado para o sistema forçando os sedimentos através de uma válvula de saída até a tubulação de entrega (Fig. 2.4 Estágio 3). Quando o cilindro está quase vazio, a pressão é liberada, o vácuo é aplicado novamente e a válvula de entrada é aberta pronta para um novo ciclo (ver Fig. 2.4) (Bray et al., 1997).

2.5. Modelagem numérica aplicada a estudos de dragagem

Com o rápido desenvolvimento de modelos numéricos para dinâmica dos fluidos, também conhecidos como CFD (*Computational Fluid Dynamics*), a modelagem computacional tornou-se uma ferramenta atraente para o estudo de fenômenos que envolvem fluxo hidrodinâmico, transportes de sedimentos e qualidade de água em ambientes como rios, lagos e áreas costeiras (Papanicolaou et al., 2008).

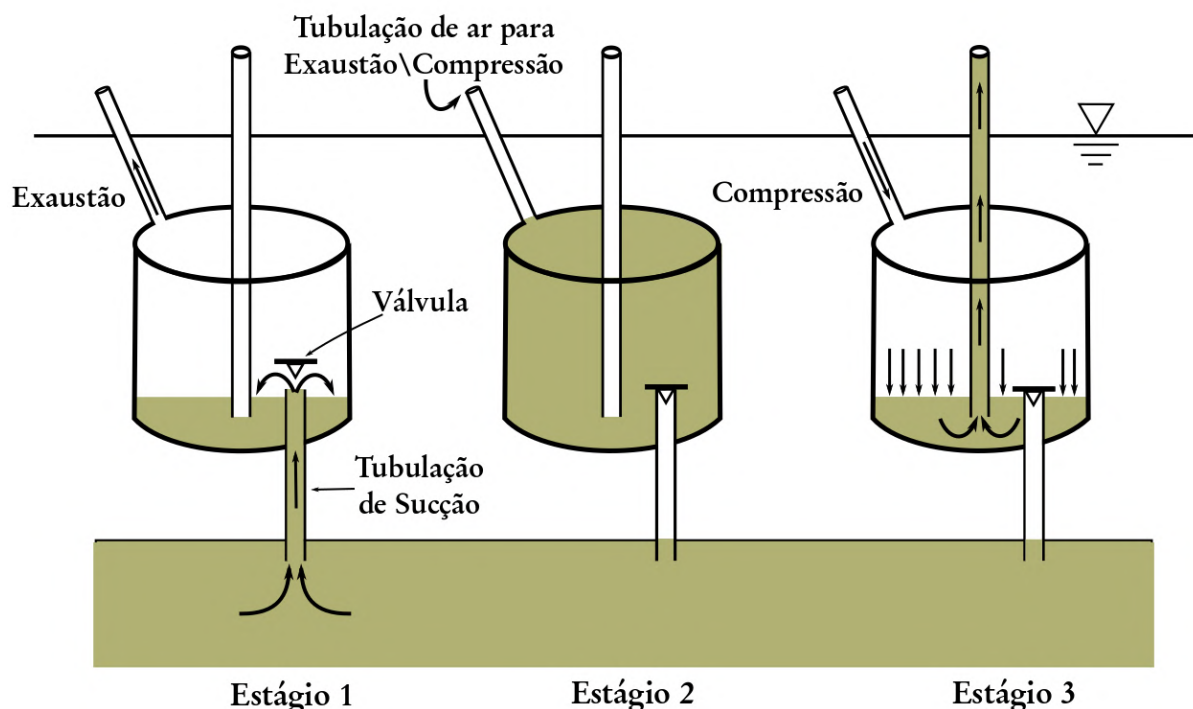


Figura 2.4 – Esquema de funcionamento das dragas pneumáticas, modificada de Bray et al. (1997).

De um modo geral, esses modelos podem ser classificados com base na gama das suas aplicações (transporte por carga de fundo ou suspensa) e a sua discretização espacial e temporal (modelos unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais; fluxo transiente ou estacionário) (Bleninger, 2006). A escolha correta de um determinado modelo depende da natureza e complexidade do problema, dos recursos do modelo escolhido para simular adequadamente o ambiente, da disponibilidade de dados para calibração e verificação do modelo, do tempo disponível e por fim, é dependente também do orçamento (Papanicolaou et al., 2008).

Existe atualmente dezenas de modelos de circulação, a maioria usada para estudos com aplicações oceânicas, costeiras e fluviais. Dentre eles, os mais citados são: MIKE21 (DHI - *Danish Hydraulics Institute*) (Jacobsen e Rasmussen, 1997), POM (*Princeton Ocean Model - Princeton University*) (Giunta et al., 2007), ECOM-si (Street e Harries, 1991), DELFT3D (*Delft Hydraulics*) (Deltares, 2014), TELEMAC (*Electricité de France and Wallingford*) (Hervouet, 2000) e SisBahia (Universidade Federal do Rio de Janeiro) (Rosman, 2000).

Nos últimos anos abriu-se uma nova gama de aplicações para estudos de modelagem hidro-morfodinâmica: as operações de dragagem. Nesse sentido, essa ferramenta vem sendo utilizada para a previsão de volumes e periodicidade que essas atividades serão realizadas, bem como, podem ser

utilizados para prever/avaliar potenciais impactos relacionados a essas operações, como por exemplo: modificações nos padrões hidrodinâmicos, sedimentares, tempo de renovação de água, ecológicos e dispersão de pluma de sedimentos finos contaminados ou não nos corpos d'água (Milliman et al., 1985; Syvitski et al., 2005; Wang et al., 2013; Becker et al., 2015; Zhao et al., 2018).

Visto isso, a modelagem numérica está abrindo caminho para um barateamento dos estudos relacionados a estas operações, por outro lado, não descarta-se a necessidade de análises de dados coletados *in situ* (Staniszewska et al., 2017). Além disso, os modelos estão cada dia mais fornecendo resultados precisos, logo, as tomadas de decisões baseada nos resultados modelados podem acelerar o início das operações e otimizar o tempo de execução das mesmas (Paarlberg et al., 2015).

2.5.1. Estudos mundiais

Nos Estados Unidos, Je et al. (2007) estudaram os impactos na qualidade de água durante operações de dragagem de manutenção executada por uma draga de corte e sucção (*cutterhead dredge*) no Rio Savannah em 1993. O objetivo do trabalho foi desenvolver um modelo numérico bidimensional de transporte de sedimentos para estimar a dispersão de sedimentos em uma operação de dragagem. Os resultados mostraram que as previsões do modelo se correlacionam razoavelmente bem com dados de campo e dessa forma, pôde ser usado para prever os perfis de concentração de uma pluma de compostos tóxicos nessas operações.

No que diz respeito aos impactos causados por dragagem nos tempos de renovação de água em lagoas costeiras, Malhadas et al. (2009) realizaram um estudo baseado em modelagem numérica na lagoa de Óbidos em Portugal, e as simulações foram feitas utilizando o modelo hidro-morfodinâmico tridimensional MOHID. Esses autores encontraram que as atividades de dragagem nessa lagoa reduziram em até 50% os tempos de renovação de suas águas.

Na China, Hu e Ding (2009) investigaram através de modelagem numérica os impactos na hidrodinâmica e salinidade causados por um projeto de aprofundamento da hidrovia no estuário Yangtze. Os autores afirmaram que houve uma diminuição das velocidades de corrente durante eventos de vazante, por outro lado, houve um aumento na intrusão salina com o aprofundamento da batimetria.

No mesmo estuário, Jiang et al. (2013) e Luan et al. (2018) investigaram os efeitos que essas intervenções causaram no transporte de sedimentos em suspensão. Os estudos foram desenvolvidos através de dados coletados em campo e experimentos numéricos. A análise indicou que os valores de concentração de sedimentos em suspensão foram intensificados, principalmente nas estações chuvosas, e houve mudanças nos padrões de erosão/deposição nesse ambiente.

Em Bangladesh, Alam e Matin (2013) fizeram simulações numéricas hidro-morfodinâmicas no rio Karnafuli utilizando a suíte de modelagem Delft3D para avaliar as respostas morfológicas causadas por obras de dragagem e proteção de margens. Os resultados encontrados indicaram um aumento na intensidade das correntes, que provocam uma diminuição das taxas de assoreamento do rio após a execução das obras, que consequentemente, resultou na diminuição dos custos das obras de dragagem de manutenção.

Zhu et al. (2015) aplicaram um modelo numérico tridimensional de circulação costeira de alta resolução na Baía de Tampa, o maior dos sistemas de estuários do litoral da Flórida, situado no Golfo do México nos Estados Unidos. Esse estudo teve o objetivo de determinar os efeitos que o aprofundamento e alargamento de uma hidrovia pode causar na circulação. Quando comparado os cenários pré e pós dragagem, os autores notaram uma diminuição na amplitude e na fase das marés no sentido de fora para dentro do estuário, e que ocorre um aumento na circulação de fundo para dentro do ambiente, resultando em um aumento na salinidade.

Na Argentina, Paarlberg et al. (2015) mostraram que a modelagem hidro-morfodinâmica pode ser usada para otimizar atividades de dragagem e despejo no Rio Pará na Argentina. Os autores estudaram diferentes estratégias, incluindo a variação na profundidade de dragagem e na distância entre o local de despejo e o canal de navegação. Os resultados indicam que as estratégias de dragagem e despejo podem melhorar a estabilidade do canal, e desse modo poderia ser alcançada uma redução de até 40% no esforço de dragagem com o descarte dos sedimentos em locais distantes da hidrovia.

Em Marrocos, Jeyar et al. (2015) estudaram os padrões de circulação hidrodinâmica na Lagoa Nador, com o objetivo de apontar mudanças no tempo de renovação das águas antes e depois da realocação da conexão desse corpo hídrico com o mar. Para isso foi utilizado o modelo hidrodinâmico bidimensional UFV-SWM (2D). Desse modo, os autores concluíram que a obra contribuiu positivamente para o aumento da capacidade de renovação das águas da lagoa, diminuindo assim a vulnerabilidade à poluição.

Van Maren et al. (2016) encontraram através de modelagem numérica morfodinâmica e dados coletados *in situ*, que atividades de dragagem para criação de novas terras causaram aumento de 10mg/l na concentração média de sedimentos em suspensão no Estuário de Ems, situado na divisa entre a Holanda e a Alemanha. Os resultados numéricos desse estudo, também sugerem que há locais desse estuário onde o aumento da concentração de sedimentos em suspensão pode exceder 100 mg/l.

Na Itália, um estudo desenvolvido por Teatini et al. (2017) teve o objetivo de analisar as consequências que o aprofundamento dos canais de navegação da Lagoa de Veneza trouxeram para a

qualidade da água do aquífero que está sob esse corpo hídrico. Para isso, foi utilizado um conjunto de técnicas que envolveram coletas de campo e modelagem computacional. Os resultados da modelagem, indicam que nos locais onde se desenvolveu a dragagem, houve uma contaminação salina dos aquíferos.

Na Holanda, Lanckriet et al. (2017) mediram séries temporais de volume de sedimentos, fizeram levantamentos batimétricos e desenvolveram um modelo de equilíbrio em diversas áreas de dragagem e despejo no estuário de Scheldt, que divide a Holanda e Bélgica. Eles afirmaram que os resultados do modelo representa melhor as áreas de descarte do que os locais de dragagem, e que essa metodologia pode ser usada para prever futuros volumes de sedimentos como resultado de campanhas planejadas de dragagem ou descarte e, assim, pode servir como uma ferramenta de tomada de decisão para o gerenciamento de canais navegáveis.

Na Espanha, Reyes-Merlo et al. (2017) estudaram o transporte de sedimentos na enseada de Punta Umbría. O trabalho teve o objetivo de relacionar e quantificar a atividade morfológica com as condições hidrodinâmicas, para minimizar a quantidade e a periodicidade da dragagem de sedimentos de seus canais. Para isso, foram analisadas 18 batimetrias de alta resolução e foi utilizada modelagem para reproduzir as condições hidrodinâmica. Os resultados demonstraram que os locais com maior sedimentação correspondem com aqueles de maior convergência no fluxo total de energia. Ademais, através da redução da inclinação do leito, obteve-se um desenho mais eficiente, pois minimiza a divergência dos fluxos de energia e, conseqüentemente, a atividade do leito.

Álvarez et al. (2017) propuseram uma abordagem integrada para definição de planos de operações de dragagem para o Porto de Ribadeo na Espanha. Para isso foi utilizada modelagem numérica, juntamente com dados de navegação para definir os planos de dragagem com melhor relação custo-benefício. Os resultados indicaram que há três áreas de acreção significativa, mas apenas duas delas são críticas para o funcionamento do Porto. Os autores mostraram que a abordagem integrada apresentada pode contribuir para uma tomada de decisão apropriada para o planejamento de operações de dragagem em áreas de águas rasas.

Ainda na Espanha, García-Oliva et al. (2018) utilizaram um modelo numérico tridimensional para simular diferentes cenários de dragagem na Lagoa do Mar Menor com diferentes extensões e profundidades de dragagem. Os autores encontraram que a troca de água com o oceano é altamente afetada, podendo trazer consequências negativas para o transporte sedimentar, a dinâmica da praia e as capacidades de pesca. Além do que, pode também causar uma homogeneização dos tempos de renovação de água que podem levar à perda de heterogeneidade do ecossistema.

Em Portugal, Fernández-Fernández et al. (2018) investigaram os impactos de atividades de

dragagem e despejo nos processos hidrodinâmicos na região costeira de Figueira da Foz. O estudo teve o objetivo ajudar os gestores portuários nos processos de tomada de decisão em busca de uma gestão costeira mais eficiente. Para esse propósito, foi utilizado o modelo numérico Delft3D, e foram simulados quatro diferentes cenários de dragagem e despejo. Os resultados revelaram impactos nos padrões hidrodinâmicos locais devido às mudanças batimétricas.

2.5.2. Estudos nacionais

No Brasil, poucos estudos se aplicam a operações de dragagem, muito menos com o uso de modelagem numérica. Fragoso JR et al. (2004), através de modelagem numérica bidimensional, encontraram aumento no fluxo de massa e de prisma de maré para o complexo estuarino-lagunar Mandaú/Manguaba em Alagoas, após a realização da dragagem.

Schiller et al. (2006) apresentaram um estudo sobre a obra de ampliação dos molhes da barra de Rio Grande, RS, somada às operações de dragagem. Os autores observaram que a ampliação dos molhes e a realização de dragagens no canal diminuiu a intensidade de corrente sobre o canal, consequentemente levando a um assoreamento do mesmo.

Em São Paulo, Pion e Bernardino (2018) apresentaram uma análise da deposição de sedimentos no Canal de Acesso do Porto de Santos e uma previsão anual de volumes de dragagem, considerando a atual avaliação batimétrica e profundidades de 15, 16 e 17 m através de modelagem numérica hidro-morfodinâmica. Os autores encontraram que para o cenário batimétrico atual, o modelo estima que seria necessário dragar uma média anual de cerca de 4.325.000 m³ do canal de acesso ao Porto. Quanto às profundidades de projeto de 15, 16, 17 m, teria um aumento de 15%, 55% e 80%, respectivamente, no volume dragado no canal.

Em estudo recente no estuário da Lagoa dos Patos no Rio Grande do Sul, Martelo (2019) investigou através de modelagem numérica hidro-morfodinâmica o processo de assoreamento e erosão nos canais de navegação da hidrovia que dá acesso ao Porto de Rio Grande e estudou também os impactos que as operações de dragagem provocam no ambiente estuarino. Os resultados apontam uma redução na intensidade da velocidade de corrente, um aumento da salinidade, com também um acréscimo na taxa de assoreamento do canal de navegação. O sistema de modelagem se mostrou satisfatório na representação do ambiente e, com os devidos aprimoramentos, pode ser uma ferramenta útil e menos custosa para complementar relatórios técnicos das operações de dragagem que ocorrem no porto do Rio Grande.

Sendo assim, o presente trabalho vem a contribuir para o cenário de estudos nacionais frente

ao uso de modelagem numérica com operações de dragagem. Aumentando assim a aplicação de conhecimentos teóricos e práticos dentro de uma abordagem computacional do ambiente lagunar da Lagoa Mirim.

3. ÁREA DE ESTUDO

3.1. A bacia da Lagoa Mirim

Localizado no extremo sul do Brasil o Complexo Lagunar Patos-Mirim é denominado como o maior sistema de lagunas costeiras da América Latina (Costi et al., 2018). Esse sistema é composto pelas lagunas do Patos (LP) e Mirim (LM), estando elas conectadas por um longo canal natural de aproximadamente 78 km de extensão, e denominado de Canal São Gonçalo (CSG). Nesse sistema, as águas da LM são drenadas por esse canal e deságuam no Estuário da LP.

A bacia de drenagem que compõe esse complexo faz parte do sistema hidrográfico Patos-Mirim, esse compreende uma porção do estado do Rio Grande do Sul (sul do Brasil) e leste do Uruguai. De acordo com Hirata et al. (2010), esse sistema de drenagem tem uma área de aproximadamente 200.000 km², só a LP drena uma área de aproximadamente 145.000 km². Já superfície da bacia de drenagem da LM possui 58.400 km², dos quais 32.704 km² estão no Uruguai e 25.696 km² no Brasil. Ademais, possui seis sub-bacias principais, a sub-bacia do Jaguarão (13,1% da área total) é a maior do lado brasileiro, e a do Cebollati (29,8%) sendo a maior do lado uruguaio (ver na Fig.3.1).

Segundo Munar et al. (2018), a Lagoa Mirim é o principal corpo hídrico da bacia, e seus principais afluentes são os rios Jaguarão, Taquari e Cebollati. A área superficial dessa laguna possui aproximadamente 4000 km² e, desse modo, é considerada como o terceiro maior corpo lagunar da América do Sul. Ela possui 190 km ao longo do seu eixo principal e uma largura média de 40 km, com uma profundidade média de 4,5 m. As maiores profundidades são encontradas na região sul, sendo essa também a mais estreita. Já a região norte da laguna é a mais rasa e larga e tem profundidade média de 3,0 m. De acordo com o mesmo autor, o lago possui um volume que pode alcançar 17 km³ de água dependendo as condições hidrológicas e do fluxo de saída.

A região possui clima subtropical, com média anual de temperatura entre 14°C e 18°C e a precipitação oscila entre 1.250 mm a 2.000 mm em média anualmente (Santos et al., 2004; Costi et al., 2018). Entretanto, as taxas de precipitação observadas na região sofrem impactos importantes de fenômenos climáticos, como El Niño (EN) e La Niña (LN) (Grimm e Saboia, 2015). Portanto, em anos que acontecem o fenômeno La Niña ocorre a diminuição da precipitação. Já em anos que ocorre El Niño, há a tendência de aumento da precipitação na região Sul do Brasil. Beltrame e Tucci (1998) observaram chuvas acima da média com até 2.000 mm/ano foram observadas durante eventos de EN, e os menores valores médios registrados foram (próximo a 800 mm/ano) observados durante o LN de 1988. Segundo Hirata et al. (2010), há ciclos de oscilações de seis a oito anos, e um ciclo sazonal

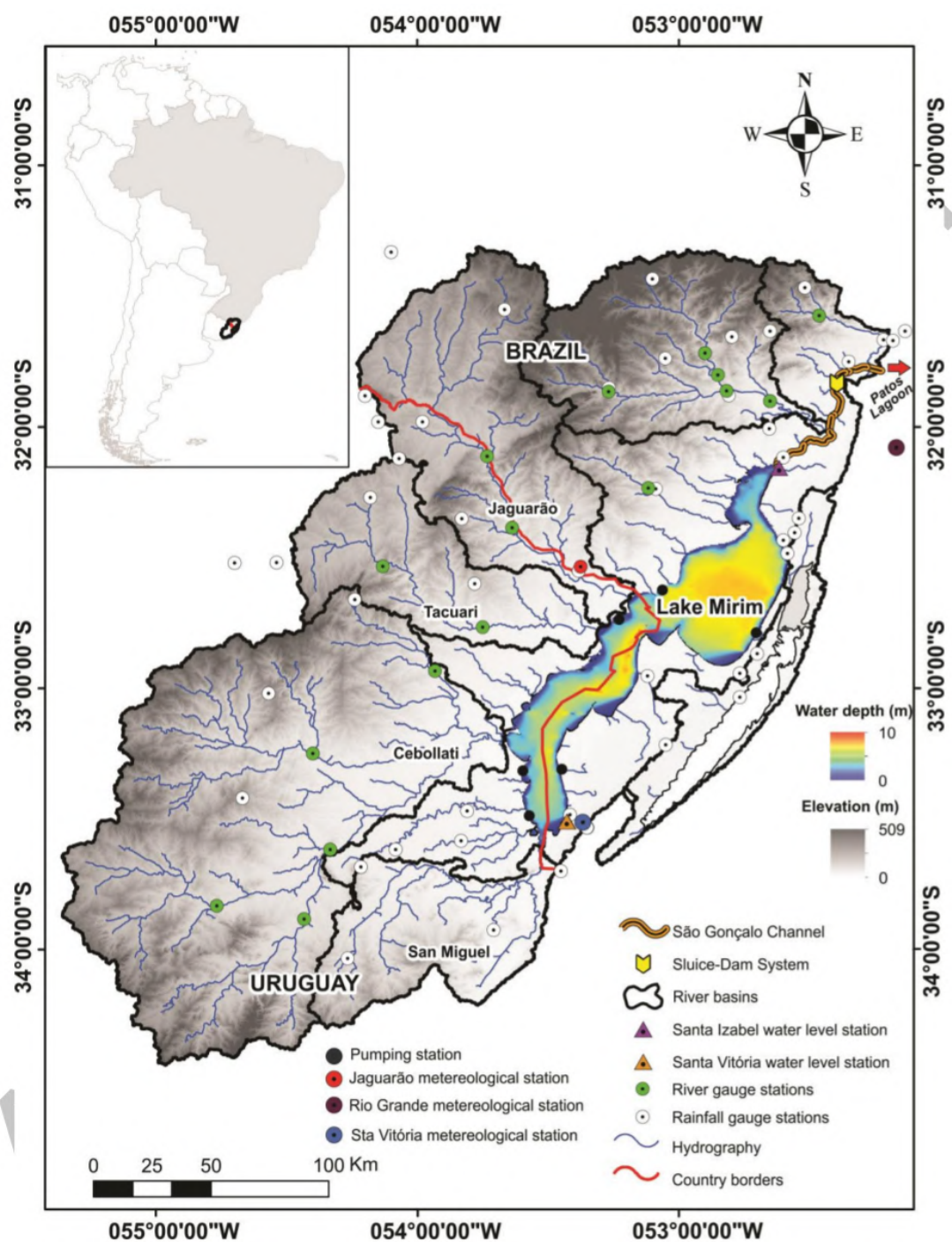


Figura 3.1 – Localização das sub-bacias de drenagem dos principais rios da Lagoa Mirim. Fonte: Munar et al. (2018).

caracterizado por anomalias de nível negativas durante o verão, e positivas durante o inverno. Durante as estações de cheia, a água da LM-CSG espalha-se por suas extensas planícies de inundação, e pode eventualmente se conectar à Lagoa Mangureira, desse modo essas três lagunas (Patos-Mirim-Mangueira)

formam o maior complexo lagunar da América do Sul (Kjerfve, 1986; Santos et al., 2004).

A direção e intensidade dos ventos são altamente variáveis durante o ano na região. Entretanto, a direção predominante é de nordeste, mas durante as estações de outono e inverno há um acréscimo na incidência de ventos de quadrante sul em contraste com o que ocorre no verão e primavera (Spagnoli et al., 2002). De acordo com Parise et al. (2009), isso é determinado pela circulação atmosférica anticiclônica sobre o Oceano Atlântico sul. Por outro lado, os ventos vindo do quadrante sul também são frequentes, e se intensificam durante as passagens de frentes frias e ciclones extras tropicais. Ademais, esses ventos de sul ocorrem mais frequentemente no inverno em resposta ao deslocamento da frente polar para o norte. Segundo Costi et al. (2018), a passagem dessas frentes e de ciclones extratropicais, são os principais processos atmosféricos que causam precipitações na bacia da LM. Tais frentes frias chegam na bacia de drenagem da LM antes do que na da LP, desse modo frequentemente causam eventos de precipitação mais severos no primeiro.

Esse sistema tem importância econômica e estratégica tanto para o Brasil, quanto para o Uruguai. Antes dos anos 1970, a intrusão de água salgada foi observada em períodos de baixa descargas dos rio, que impedia o uso de suas águas como fonte de água potável e irrigação agrícola (Oliveira et al., 2015). Além disso, esse sistema hidrológico binacional também possui enorme importância ambiental e socioeconômica. Pois, ao redor da LM e do CSG, há áreas úmidas altamente produtivas que abrigam uma rica biodiversidade e são protegidas por leis nacionais (Seeliger et al., 1998).

Em 1977, devido a pressão econômica, foi construída uma Barragem-Eclusa no Canal São Gonçalo, cuja a profundidade é de 7 m e largura de 250 m, ela se localiza a três quilômetros da cidade de Pelotas, impossibilitando a entrada de água salgada em aproximadamente 80% do canal e em toda a área da Lagoa Mirim (Gouvêa et al., 2010). O portão da barragem possui 3,2 m de altura e 12 m de comprimento, promovendo uma diferença de nível de água de 40 cm entre a montante e a jusante da obra (CLM, 1970). A eclusa permanece fechada em períodos de baixa descarga na LM (e consequentemente baixo nível), que ocorrem principalmente durante o verão e o outono.

A construção dessa barragem garantiu as plantações de arroz e água potável para o consumo humano e da indústria, na cidade de Rio Grande e vizinhanças. No entanto, esse represamento mudou completamente a hidrodinâmica e a ecologia da LM (Santiago et al., 2010). Segundo o mesmo autor, essa barreira construída pelo homem para evitar a salinização causou uma diminuição nas espécies estuarinas na laguna, o que ocasionou a diminuição nos desembarques de peixes de 50.000 toneladas em 1970 para 40.000 toneladas no final dos anos 90. Atualmente o principal uso da água da LM é a extração direta para abastecimento e irrigação de plantações de arroz, no Brasil e no Uruguai. Essa

região da América do Sul é responsável pela produção de 50% da produção de ambos os países (IRGA, 2006).

Atualmente, está prevista a implementação de uma hidrovía internacional conectando Montevideu (Uruguai) e São Paulo (Brasil). Especialmente devido ao recente aumento na produção agrícola e industrial, Brasil e Uruguai estão avaliando a reativação da chamada “Hidrovía do Mercosul”, cuja extensão é de aproximadamente 650 km e conecta o norte da LP ao sul da LM, com conexão direta com o porto de Rio Grande (Oliveira et al., 2019). É esperado que essa hidrovía seja potencialmente utilizada para a exportação de vários produtos como combustível, madeira e principalmente arroz, mas, por ser um sistema transfronteiriço, sua gestão política, econômica e ambiental existe iniciativas internacionais (DNIT, 2014).

3.2. Aspectos hidrodinâmicos

Costi et al. (2018) avaliaram a influência dos ventos incidentes e das descargas dos principais tributários no nível de água da LM. A análise sugere que essa laguna se comporta como um sistema semi-fechado que é dominado por descargas de rios em escalas longas de tempo e modulada pela ação do vento em escalas menores. Adicionalmente, foi identificado que há processos que ocorrem com periodicidade entre 64 e 300 dias, indicando que as descargas dos rios controlam a variação no nível de água da LM em escalas intra-sazonal, sazonal e anuais. Entretanto, há processos que ocorrem com períodos entre 2 e 16 dias, indicando que ventos podem modular a variação do nível de água na escala de tempo sinótica (Möller et al., 2001). Outra variável importante na dominância dos nível de água nessa laguna é a precipitação. Hirata et al. (2010) estudaram a correlação entre os níveis e as taxas de precipitação utilizando análise cruzada por Ondaleta de Morlet, e identificaram que essa variável regula a variação nos níveis de água da LM em ciclos de de 4 a 16 dias.

Oliveira et al. (2015) observaram que, devido a orientação da LM, a topografia suave e a batimetria rasa em comparação a sua área superficial, o vento local parece ser a forçante mais importante para a dinâmica da LM, transportando água entre as extremidades norte / sul. Esse efeito provoca o desenvolvimento de assimetrias nos nível de água da LM, de modo que os ventos do quadrante sul (S-SW) empurram a água para o norte, gerando altos níveis, enquanto os ventos do quadrante norte (N-NE) empurram a água para o sul, aumentando o nível da água na porção sul da lagoa Oliveira et al. (2019). De acordo com Costi et al. (2018), essa declividade varia sazonalmente e é atenuada durante o inverno e outono quando a frequência dos ventos vindos do quadrante sul aumentam consideravelmente.

Segundo Costi et al. (2018), o nível de água da LM é mais alto na parte sul. Isso ocorre devido

a dominância de ventos vindos do quadrante nordeste, que represa a descarga de água dos rios, criando uma massa de água na parte sul da laguna. Segundo o mesmo autor, os resultados mostram que o nível de água é maior 0,10 m mais alto na região sul em comparação com a parte norte. Munar et al. (2018) e Oliveira et al. (2019) também encontraram assimetrias no nível de água nessa laguna, eles afirmam que a tensão causada pelo vento produz um seiche que pode resultar em uma variação no nível de água de até 3 m entre as extremidades sul e norte.

De acordo com o Möller et al. (2001), a passagem de frentes frias sobre a região são associadas a fortes ventos de sul-sudeste que provocam o estabelecimento de um nível de água tanto na região da LM quanto na da LP. Logo, isso pode favorecer a descarga da LM, mas também impulsiona as águas do oceano contra a costa, empurrando a água do mar para o estuário e equilibrando o gradiente de pressão. Assim, a entrada de água do mar e as vastas planícies de inundação ao longo do CSG diminuem o escoamento da LM (Hirata et al., 2010).

Machado et al. (2010) calcularam a descarga média do CSG que chegou a valores de 433,41 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ e 437,141 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$, para os meses de janeiro de 2001 e julho de 2001, respectivamente. Do mesmo modo, Oliveira et al. (2015) estimou através de uma regressão polinomial de segunda ordem a vazão do CSG para a LP para o período entre Janeiro de 2009 e Dezembro de 2011, e mostrou que a vazão da LM oscilou entre 98,54 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ em janeiro de 2009 a 1503 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ em dezembro de 2009, enquanto que a média calculada para o período é igual a 590,96 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$. Mais recentemente, Oliveira et al. (2019) calculou a vazão do CSG durante o ano de 2002 através de modelagem numérica, e encontrou que a descarga desse corpo hídrico depende da diferença entre no nível de água da LM e da LP. Os autores afirmam que a vazão da LM tem valores entre 300 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ e 2.250 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$, com um valor médio de 1.100 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$.

Como a vazão dos contribuintes da LM são superiores a 30.000 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ e a capacidade de descarga máxima do CSG para a LP é inferior a 2.000 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$, a LM acumula a diferença dessas descargas, atuando como um grande reservatório de água doce. Nesse sentido, Oliveira et al. (2015) estimou o tempo de descarta da LM e encontrou que o tempo de descarga das águas no interior da Lagoa Mirim é alto, sendo em média de 595 dias. Considerando a maior vazão para o período, esse tempo diminui para 195 dias e aumenta para 1500 dias quando se considerada a vazão mínima encontrada.

Silva et al. (2019) estimou o tempo de residência das águas da LM através de modelagem numérica e encontrou que, a laguna apresentou valores maiores no setor sul (> 250 dias) e menores no norte (< 100 dias), com uma média total de 180 dias. Ademais, a margem oeste apresenta menor

valor do que a margem leste, principalmente no setor norte, aos efeitos combinados de um célula de recirculação com a descarga dos rios. Segundo os autores, a formação do giro no setor norte causa um aumento do TR de até 100 dias quando comparado aos episódios em que o giro é menos intenso, isso ocorre principalmente durante os meses de verão. No geral, o setor sul apresenta uma menor capacidade de renovação, o que pode melhorar as questões de qualidade da água em um cenário de longo prazo, enquanto o setor norte apresenta períodos com estagnação relativamente maior devido ao padrão de circulação de giros na região.

3.3. Aspectos morfodinâmicos e sedimentares

A LM é definida morfodinamicamente como uma laguna estrangulada, cuja conexão com o oceano ocorre de forma indireta através do CSG que liga a LM ao estuário da LP (Silva et al., 2019). Segundo Oliveira et al. (2015), três fatores contribuem para ela ser definida dessa forma: o auto escoamento dos tributários durante parte do ano, e a configuração estrangulada na LM conectada com o CSG e a recalescência de ventos da direção nordeste. Essa laguna possui cerca de 190 km ao longo do seu eixo principal e uma largura média de 40 km e possui uma profundidade média de 4,5 m, mas há áreas que chegam a 10 m (Munar et al., 2018).

O Sistema LM - CSG encontra-se na Planície Costeira do Rio Grande do Sul, e se desenvolveu durante o período Quaternário quando às oscilações do nível do mar produziram um gradiente de declividade muito baixo, resultando na planície costeira e na plataforma continental do Rio Grande do Sul e, conseqüentemente, foram formados sistemas de lagunas-barreiras (Tomazelli et al., 2017). A deposição de um sistema de leques aluviais e quatro subseqüentes sistemas de laguna-barreira (Barreiras I, II, III e IV) evoluirão de oeste para leste, resultando em um terreno muito plano, onde as maiores elevações estão relacionadas especialmente com os depósitos mais antigos (Rosa et al., 2016). De acordo com Tomazelli et al. (2017), a formação inicial da Lagoa Mirim se deu conseqüentemente pela formação da Barreira II, que ocorreu durante o segundo ciclo transgressivo-regressivo do Pleistoceno. Já a formação final tanto da LM, quanto da LP, foi ocasionada pelo desenvolvimento da sistema Barreira III.

A geomorfologia da região possui terras adjacentes de baixa declividade, que são acopladas tanto à corpos de água de pouca profundidade, quanto à bacias de drenagem que possuem altas taxas de precipitação, isso implica no constante transbordamento do sistema LM - CSG. O CSG flui sobre um extenso depósito lacustre e contínuo e antigo (Holoceno e Pleistoceno) (Tomazelli et al., 2017), cercado por zonas úmidas perenes, e inundam frequentemente (Duarte, 2013).

De acordo com Vieira et al. (2020), os rios da bacia hidrográfica da LM (Cebollati, Tacuarí, Jaguarão e Piratini) drenam as terras altas do embasamento Pré-Cambriano (Escudo do Rio Grande do Sul e Uruguai), cujos sedimentos erodidos são fluvialmente transportados e depositados na zona costeira do sistema Patos-Mirim. Uma margem de sedimentos grossos (principalmente cascalho, areia grossa e lama) dos sistemas de leques aluviais fazem a transição entre as terras altas (maiores que 500 m de altitude) e as baixas e suaves planícies costeiras (Dillenburg e Barboza, 2014). Segundo Dillenburg et al. (2017), os depósitos sedimentares ao redor da LM alternam principalmente areias finas de barreiras costeiras e lamas de lagoas dos vários sistemas deposicionais de laguna-barreira depositados ali durante o Quaternário.

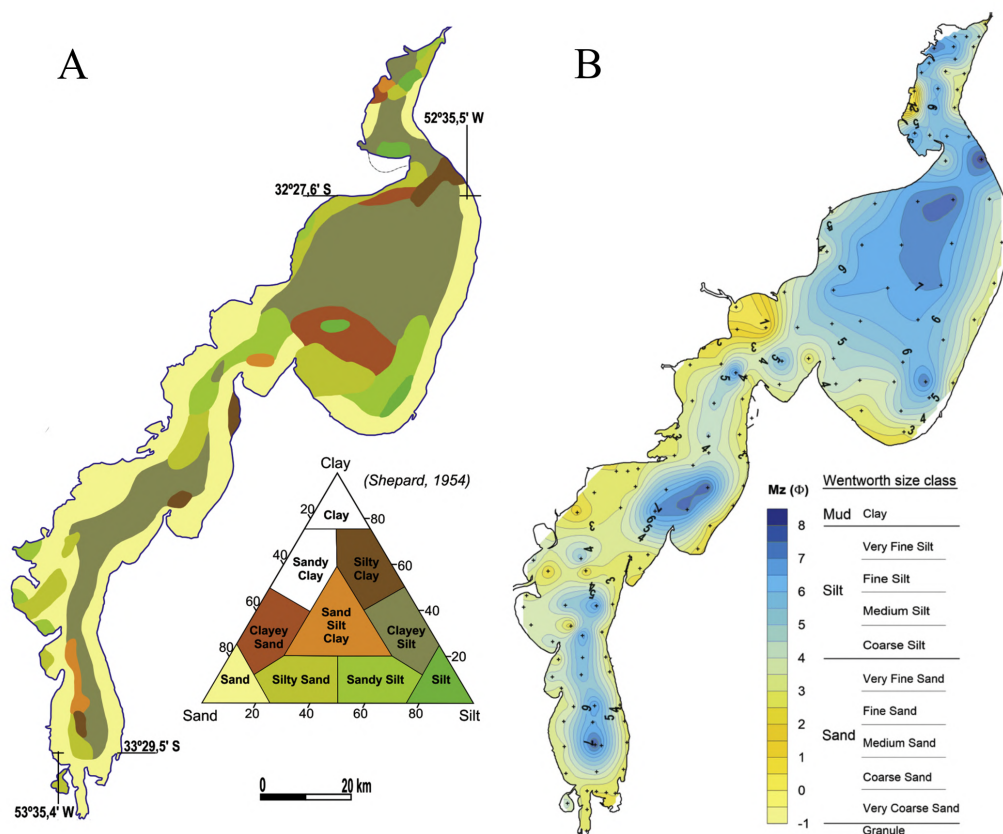


Figura 3.2 – Composição dos sedimentos superficiais do fundo da Lagoa Mirim. Os quadros (A) e (B) mostram a classificação dos sedimentos conforme Shepard (1954) e (B) Wentworth (1922). Modificado de Vieira et al. (2020).

Vieira (1995) analisou a textura dos sedimentos da LM e determinou que o fundo lagunar é composto por um mosaico de frações sedimentares, que vão de frações maiores como areia, até as menores como silte e argila (Fig.3.2). As máxima profundidades em tais áreas alcançam 6 m e as composições sedimentares são dominadas por frações finas com valores de 30 a 40% de silte e de 20 a

30% de argila, enquanto que nas áreas mais rasas e periféricas as principais fácies arenosas abrange a todo o contorno da zona litorânea acima da isóbata de 3-4 m. Tais fácies correspondem basicamente de areia com uma menor escala de areia-siltosa e silte-arenoso (Vieira et al., 2020).

As taxas de sedimentação para os canais de navegação da LM foram estimados pelo DNIT (2014) através de mensuração batimétrica obtidas do trabalho de Azambuja (2005). A partir disso, foi calculou a taxa de sedimentação para cada canal entre os anos de 2002 e 2008, os resultados indicaram que no Canal do Sangradouro apresentou taxa de sedimentação de $19,0 \text{ cm.ano}^{-1}$, já o Canal de Santa Vitória do Palmar foi obtido uma taxa de $8,0 \text{ cm.ano}^{-1}$. Entretanto, esse valores são considerados muito altor se comparados com outros corpos lagunas da região, como por exemplo, a taxa de sedimentação da Lagoa dos Patos, que é de 3,5 e $8,3 \text{ mm.ano}^{-1}$ (Toldo Jr et al., 2006). Desse modo, o DNIT (2014) alerta que estas podem não representar a realidade atual, pois a taxa de sedimentação é um parâmetro dinâmico, resultante de aspectos que são variáveis como o clima e o uso e ocupação do solo da bacia.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. O sistema TELEMAC-MASCARET

Este trabalho foi desenvolvido utilizando um conjunto de modelos do sistema de modelagem Open TELEMAC-MASCARET¹. Esse sistema foi desenvolvido pelo *Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement* da companhia *Electricité de France* (EDF), e é formado por um conjunto de códigos, capazes de serem utilizados em estudos relacionados à hidrodinâmica, qualidade de água, transporte de sedimentos e propagação de ondas geradas pelo vento, podendo, ainda, ser aplicado em estudos de regiões *offshore*, costeiras e fluviais, bem como lagoas rasas e estuários (Villaret et al., 2009).

Essa suíte de modelagem é composta por um conjunto de módulos que tem a capacidade de simular processos ambientais, tais como: hidrodinâmica em uma, duas ou três dimensões, que são, nessa ordem, o MASCARET, TELEMAC-2D e TELEMAC-3D, transporte sedimentar (SISYPHE), propagação de ondas geradas pelo vento em áreas costeiras (TOMAWAC), propagação de ondas em costas e portos (ARTEMIS) e modelagem de operações de dragagem (NESTOR). Todos eles são baseados em malhas não estruturadas e algoritmos fundamentados nas técnicas dos Elementos Finitos ou Volumes Finitos. Ver mais detalhes em Hervouet (2007).

Visto isso, serão apresentados nas seções seguintes os respectivos módulos que serão utilizados para o desenvolvimento desse trabalho.

4.1.1. Módulo hidrodinâmico - TELEMAC-2D

O módulo hidrodinâmico TELEMAC-2D foi escolhido para simular as condições hidrodinâmicas do complexo Lagoa Mirim - São Gonçalo. Esse modelo, resolve as equações de águas rasas propostas inicialmente por Barré de Saint-Venant em 1871, que são, até hoje, de extrema importância para estudos relacionados à hidráulica marítima e fluvial. Essas equações são obtidas a partir da integração na vertical das equações tridimensionais de Navier-Stokes para o fluxo turbulento em superfície livre.

Segundo Hervouet (2007), esse equacionamento pode ser utilizado para estudos e projetos de hidráulicos e ambientais, como por exemplo o cálculo de marés, ondas de tempestades, inundações, estabilidade de estruturas, transporte sedimentos e outros. Os principais resultados desse modelo são a profundidade da água e as componentes da velocidade de corrente nas direções x e y, sendo dadas para

¹opentelemac.org

cada nó da malha computacional.

De acordo com Hervouet (2007), o código TELEMAC-2D resolve simultaneamente as seguintes equações:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla} h + h \cdot \text{div}(\vec{u}) = S_h \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla} \vec{u} = -g \cdot \frac{\partial Z}{\partial x} + S_x + \frac{1}{h} \text{div}(h\nu_t \vec{\nabla} \vec{u}) \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla} \vec{v} = -g \cdot \frac{\partial Z}{\partial y} + S_y + \frac{1}{h} \text{div}(h\nu_t \vec{\nabla} \vec{v}) \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla} T = S_T + \frac{1}{h} \text{div}(h\nu_T \vec{\nabla} T) \quad (4.4)$$

A Eq.4.1 refere-se à equação da continuidade, já as Eqs.4.2 e 4.3 representam a conservação de quantidade de movimento nas coordenadas x e y. E por ultimo a Eq.4.4 descreve advecção-difusão dos traçadores. Onde, h é a profundidade da água (m), $\vec{u}$ e $\vec{v}$ (m.s^{-1}) são componentes da velocidade, T (g.l^{-1} ou $^{\circ}\text{C}$) traçador passivo dissolvido na água, g (m.s^{-2}) aceleração da gravidade, ν_t, ν_T (m.s^{-2}) são os coeficientes de difusão turbulenta, Z (m) é a elevação da superfície livre, t (s) o tempo, x, y (m) coordenadas horizontais do espaço, S_h (m.s^{-1}) fonte ou sumidouro do fluido, S_x, S_y (m.s^{-2}) são termos de fonte ou sumidouro em equações dinâmicas e S_T (g/l/s) fonte ou sumidouro do traçador. Essas equações são dadas em coordenadas cartesianas. Logo, S_x e S_y (m.s^{-2}) são termos fonte que representa o vento, a força Coriolis, a fricção de fundo e fontes ou sumidouros no domínio.

Modelagem da turbulência

O TELEMAC-2D apresenta diferentes modelos de turbulência. Nesse estudo será utilizado o modelo de turbulência k- ϵ , sendo esse um dos tipos de modelo de viscosidade turbulenta mais comuns, tendo a viscosidade cinemática turbulenta modelada pela Eq.4.5.

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (4.5)$$

Onde, C_μ é uma constante adimensional (normalmente é 0,09), k é a energia cinética turbulenta ($\text{m}^2.\text{s}^{-2}$) e ϵ é a taxa de transferência ou dissipação de energia ($\text{m}^2.\text{s}^{-3}$). Já os valores k e ϵ são calculadas por equações diferenciais de transporte, sendo elas apresentadas nas Eq.4.6 e Eq.4.7.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}(k) = \frac{1}{h} \text{div} \left(h \frac{V_t}{\sigma_k} \vec{\nabla} k \right) + P - \epsilon + P_k v \quad (4.6)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}(\epsilon) = \frac{1}{h} \text{div} \left(h \frac{V_t}{\sigma_\epsilon} \vec{\nabla} \epsilon \right) + \frac{\epsilon}{k} (c_1 \epsilon P - c_2 \epsilon \epsilon) + P_\epsilon(v) \quad (4.7)$$

Esse modelo de turbulência assume que a razão entre o atrito de Reynolds e a taxa de deformação são iguais em todas as direções, fato que resulta em uma viscosidade turbulenta isotrópica. Apresentando, assim, limitações em casos onde a taxa de deformação é muito alta, como por exemplo no caso de vórtices criados por obstáculos no fluido. Entretanto, a escolha desse modelo foi feita pois, ele representa uma melhor solução do que o modelo de comprimento de mistura, sendo mais eficiente em termos de custo computacional do que os modelos do tipo *Large Eddy Simulation* (Wilson et al., 2002).

Configurações do modelo hidrodinâmico

Para o desenvolvimento deste trabalho, o TELEMAC-2D foi configurado para a execução das simulações com base em uma calibração realizada por Costi et al. (2018) no mesmo domínio computacional. Desse modo, a fricção com o fundo foi parametrizada com o coeficiente de Manning com valores de $m = 0,035 \text{ s.m}^{-1/3}$ para o leito da Lagoa Mirim e $m = 0,05 \text{ s.m}^{-1/3}$ para as planícies de inundação. Além disso, o mesmo autor encontrou um valor de 5.10^{-6} para o melhor fator de influência do vento para o mesmo domínio computacional, as demais configurações utilizadas estão expostas na Tab.4.1.

Tabela 4.1 – Configuração adotadas para o TELEMAC-2D.

Período de simulação	01/01/2000 a 31/12/2004
Salvamento dos resultados	a cada 24 horas
Paralelismo	24 núcleos
Passo de tempo	60 s
Projeção geográfica	WGS-84
Coeficiente de Coriolis	Variável
Modelo de turbulência horizontal	k - ϵ
Lei de fricção de fundo	Manning - Variável
Tidal Flats	Sim
Coeficiente de influência do vento	5.10^{-6}

4.1.2. Módulo morfodinâmico - SISYPHE

O SISYPHE é um módulo de transporte de sedimentos e morfodinâmica que faz parte do sistema de modelagem numérica *open* TELEMAC-MASCARET. Nesse módulo, as taxas de transporte de sedimentos, divididas em carga de material transportado junto ao fundo (*bedload*) e em suspensão (*suspend load*). Do mesmo modo, os resultados são calculadas e apresentados para cada nó da malha como função de vários fluxos (velocidade, profundidade de água, altura de onda, etc.), além de parâmetros físicos dos sedimentos, como o diâmetro do grão, a densidade relativa, a velocidade de sedimentação, etc.

A carga de material transportada junto ao fundo (*bedload*), é calculada utilizando fórmulas clássicas de transporte de sedimentos provenientes da literatura. Já a carga em suspensão (*suspended load*), é determinada resolvendo uma equação de advecção e difusão para a concentração de sedimentos em suspensão integrado na vertical. Por fim, a equação de evolução do fundo é calcula a partir da equação de Exner.

O SISYPHE é aplicável a trabalhos relacionados a sedimentos não coesivos ($d_{50} > 60 \mu m$), uniformes ou não, sedimentos coesivos ($d_{50} < 60 \mu m$) ou a combinação de ambos. A composição do leito é representada por um número finito de classes sedimentares, cada uma caracterizada pelo seu diâmetro médio (d_{50}), massa específica do grão e velocidade de sedimentação. Ademais, os processos de transporte de sedimentos também podem levar em consideração os efeitos da inclinação do fundo, dos leitos rígidos e de correntes secundárias. Para os sedimentos coesivos, o efeito da consolidação pode ser considerado. Para mais informações consultar o manual técnico desse modelo em (Tassi e Villaret, 2014)

Neste trabalho, foi utilizada a opção de transporte sedimentar por carga de material transportado em suspensão (*suspend load*). Portanto, somente a formulação relacionada a esta forma de transporte será abordado nesta seção.

A camada de fundo

A Fig.4.1 facilita a compreensão de como é tratada a camada de fundo no SISYPHE. Nesta figura, a porção azul mostra o domínio hidrodinâmico considerado e calculado pelo TELEMAC-2D. Esta camada é seguida pelo envelope sedimentar ativo, em marrom, no qual o SISYPHE realiza a mobilização dos sedimentos e evolução do fundo. Por fim, a última porção, em cinza, é chamada de camada rígida, ela limita a malha numérica em sentido vertical.

Entre a camada hidrodinâmica e sedimentar, há uma interface, onde ocorrem a interação

das correntes com o fundo e consequentemente o transporte sedimentar (*bedload* e *suspend load*), resultando assim na modificação da batimetria.

A camada sedimentar no SISYPHE (em marrom na Fig.4.1) pode ser discretizada de acordo com o número de camadas definidas pelo usuário, podendo ainda receber informações referentes a quantidade, massa específica, diâmetro médio e outros. A espessura da camada sedimentar presente no modelo é, por padrão, de 100 metros. Abaixo da última camada sedimentar encontra-se o fundo rígido, ou seja, o limite inferior da malha numérica.

Transporte sedimentar

Partículas não coesivas entram em movimento assim que a tensão de cisalhamento aplicada ao material do leito excede a tensão crítica de cisalhamento. Geralmente, partículas de silte e argila entram em suspensão, e partículas de areia e cascalho rolam, deslizam e saltam em uma fina camada próxima ao fundo, também chamada de *bed layer*. A espessura dessa camada é tipicamente menor que 1 mm em canais de fundo arenoso, já em leitos compostos com cascalho ela pode ser maior que dez centímetros (Rijn, 1984).

O transporte total de sedimentos Q_t (Eq.4.8) é definido como um fluxo de sedimentos transportados por unidade de tempo, e pode ser dividido como transporte de carga em suspensão (*suspend load*) e de fundo (*bedload*), respectivamente (Q_s) e (Q_b) como é apresentado na Fig.4.1.

$$Q_t = Q_s + Q_b \quad (4.8)$$

Interação fluido-sedimento

A tensão de cisalhamento de fundo ou resistência ao escoamento, pode ser caracterizada por diversos fatores como: rugosidade superficial, vegetação, irregularidades do canal, erosão e assoreamento, formas de fundo, profundidade e largura da seção do escoamento. Essa resistência é simbolizada através de um coeficiente (C_d), que representa a influência de qualquer elemento que origine tensões de cisalhamento e turbulência devido às suas saliências. Esse efeito é de grande importância para o transporte sedimentar, pois, é ele que induz o movimento das partículas sólidas.

A tensão de cisalhamento com o fundo τ_b é calculada para nó em cada passo de tempo de acordo com a equação a seguir (Tassi e Villaret, 2014):

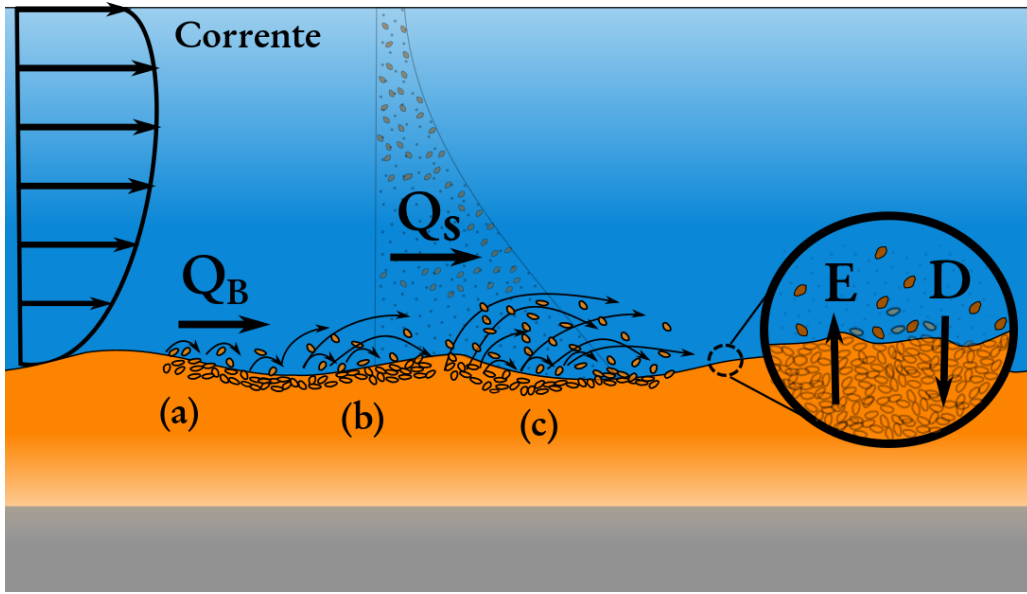


Figura 4.1 – Transporte de sedimento no SISYPHE, em suspensão Q_s e de fundo Q_b por rolamento (a), saltação (b) e arrasto (c). E e D se referem, respectivamente, aos fluxos de erosão e deposição. As camadas sedimentares e impermeáveis estão representadas pelas cores laranja e cinza, nessa ordem.

$$\tau_b = \frac{1}{2} \rho C_d (u^2 + v^2) \quad (4.9)$$

Onde, u e v são as componentes das velocidades ao longo das direções x e y em coordenadas cartesianas e C_d é o coeficiente de fricção com o fundo. A parametrização do C_d pode ser feita através de diversas fórmulas, dentre elas as principais são: Strickler, Nikuradse, Manning, Chézy, além de também poder ser definida pelo usuário ou pela previsão da rugosidade de fundo, através de simulações hidrodinâmicas (Tassi e Villaret, 2014). Neste trabalho, o C_d foi determinado utilizando a formulação de Manning (Eq.4.10).

$$C_d = \frac{2gm^2}{h^{1/3}} \quad (4.10)$$

Início do movimento

De acordo com a teoria de Shields, o início do movimento se dá quando a tensão de cisalhamento com o leito excede o valor crítico de cisalhamento do sedimento. Desse modo, quando esse valor é ultrapassado, a corrente tem a capacidade de mobilização as partículas de sedimentos. O diagrama de Shields, ilustrado na Figura 4.2, é um dos métodos mais usado para determinação da

condição incipiente de movimento, ele se baseia na tensão tangencial no leito. Portanto, em pontos situados acima da curva representam a condição de movimento e pontos abaixo correspondem às partículas em repouso.

As forças atuantes nas partículas de sedimentos são: a tensão de cisalhamento com o fundo τ_b , massa específica do sedimento ρ_s , massa específica do fluido ρ , diâmetro do grão d_{50} , gravidade g e a viscosidade dinâmica μ (Julien, 2010). Aplicando uma análise dimensional nesses parâmetros é encontrado dois valores característicos, como:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}} \quad (4.11)$$

$$Re_* = \frac{u_* d_{50}}{\nu} \quad (4.12)$$

$$Fr_* = \frac{u_*^2}{(s-1)gd_{50}} \quad (4.13)$$

Onde Re_* é o numero de Reynolds de atrito da partícula, Fr_* é o número de Froude, $s = \rho_s/\rho$ é a densidade relativa, d_{50} é o diâmetro do grão e u_* é a velocidade de fricção. Aplicando a relação de velocidade de fricção em Eq.4.13, é encontrado a relação entre o parâmetro Shields e a tensão de cisalhamento do leito. Essa relação é chamada de tensão crítica de Shields (τ_*), e pode ser interpretada como a razão entre a força que produz o movimento da partícula e a força de resistência ao movimento. A tensão crítica de Shields é calculada pela expressão adimensional:

$$\tau_* = \frac{\tau_b}{(\rho_s - \rho)gd_{50}} \quad (4.14)$$

A condição para início do movimento é dado quando $\tau_* > \Theta_c$, ou seja a tensão de cisalhamento supera a tensão crítica de Shields.

$$\Theta_c = \frac{\tau_{ce}}{(\rho_s - \rho)gd_{50}} \quad (4.15)$$

Onde, τ_{ce} é o atrito cisalhante crítico adimensional para os sedimentos em movimento incipiente. Valores de Θ_c podem ser especificados no SISYPHE pelo usuário ou podem ser calculados pelo modelo como função não dimensional do diâmetro do grão $D_* = [\frac{\rho_s g}{(\rho-1)\nu^2}]^{1/3}$, de acordo com a relação apresentada na equação 4.16 (Tassi e Villaret, 2014).

$$\Theta_c = \begin{cases} 0.24D_*^{-1} & , D_* \leq 4 \\ 0.14D_*^{-0.64} & , 4 < D_* \leq 10 \\ 0.04D_*^{-0.10} & , 10 < D_* \leq 20 \\ 0.013D_*^{0.29} & , 20 < D_* \leq 150 \\ 0.045 & , 150 \leq D_* \end{cases} \quad (4.16)$$

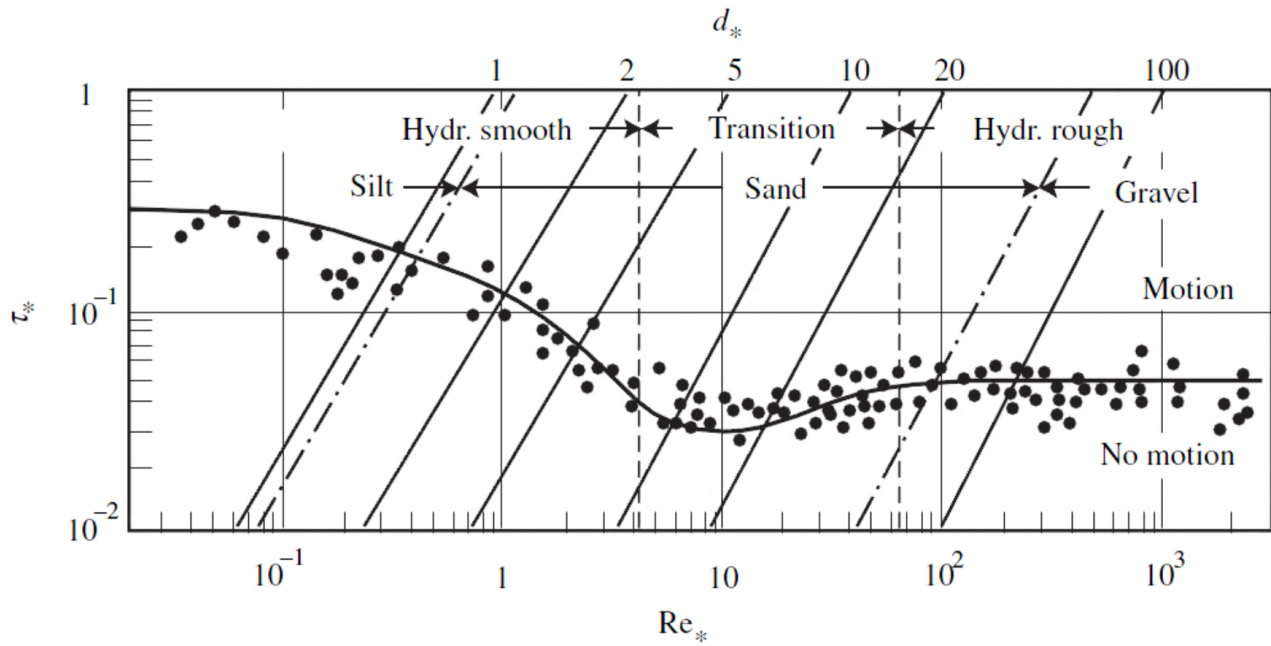


Figura 4.2 – Diagrama de Shields para tensão inicial de arraste (Julien, 2010).

Transporte de sedimentos em suspensão e mistura de sedimentos

Os sedimentos presentes em ambientes naturais como estuários, lagoas e áreas costeiras, se dão geralmente por uma mistura de água, areia, lama e matéria orgânica. Essa heterogeneidade pode ser modelada por uma mistura de sedimentos coesivos e não coesivos pelo SISYPHE (Tassi e Villaret, 2014). Para modelar esse processo, esse módulo consideradas duas frações sedimentares, a primeira é não-coesiva, representada por um grão de diâmetro $D_1 > 60 \mu m$ e uma segunda coesiva, e deve possuir um diâmetro $D_2 < 60 \mu m$.

No SISYPHE a mistura de sedimentos deve ser dividida em duas classes de tamanho. Como só o transporte de sedimentos em suspensão é considerado, então a equação da advecção-difusão (balanço de massa) integrada na vertical é utilizada (Tassi e Villaret, 2014):

$$\frac{\partial hC_i}{\partial t} + \frac{\partial hUC_i}{\partial x} + \frac{\partial hVC_i}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}(h\varepsilon_s \frac{\partial C_i}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(h\varepsilon_s \frac{\partial C_i}{\partial y}) + \frac{E_i - D_i}{h} \quad (4.17)$$

Onde $i = 1,2$ são as classes sedimentares, C_i (kg.m^{-3}) é a concentração dos sedimentos, ε_s é o coeficiente de difusão, E_i são as taxas de erosão ($\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$), D_i ($\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) são as taxa de deposição para cada uma das frações sedimentares e ε_s é o coeficiente de difusão turbulenta da fração de sedimento.

Esse modelo permite ao usuário utilizar diferentes formulações para o cálculo da concentração de equilíbrio do material em suspensão, como por exemplo: Zyserman-Fredsoe, van Rijn, Soulsby & van Rijn e Bijker. Para mais detalhes, ver em Rijn (1984) e Tassi e Villaret (2014).

Erosão e sedimentação

O processo de erosão (E_i) e deposição (D_i) dependem no nível energético do escoamento, portanto, quanto maior sua intensidade, maior será a capacidade erosiva. Por outro lado, a perda permanente ou temporária de energia favorece a sedimentação de uma parcela do material em suspensão. Podemos destacar que, ou sedimentos coesivos e e não-coesivos apresentam comportamentos distintos para essas situações.

Fluxo de erosão

O fluxo de erosão depende da composição do material que compõe o fundo. De modo que, essa taxa de erosão (E_i) é calculada pelo SISYPHE pelas equações a seguir:

- Se $f_2 \leq 30\%$ (dominado por areia), é assumido a concentração de equilíbrio:

$$E_1 = \begin{cases} w_{s1} C_{eq} f_2 & \text{se } \tau_b > \tau_{ce} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4.18)$$

Com f_1 e f_2 são os volumes de areia e lama em porcentagem na camada sedimentar, τ_b é a tensão de cisalhamento com o fundo, τ_{ce} é a tensão crítica para início do movimento do sedimento e C_{eq} é a concentração de equilíbrio (ver em (Tassi e Villaret, 2014)).

- Se $f_2 \geq 50\%$ (dominado por lama), é assumido a lei de Krone-Partheniades:

$$E_2 = \begin{cases} M[(\frac{\tau_b}{\tau_{ce}}) - 1] & \text{se } \tau_b > \tau_{ce} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4.19)$$

M ($\text{kg.m}^{-2}/\text{s}$) é a constante da lei de erosão de Krone-Partheniades.

- Se $30\% < f_2 < 50\%$, é assumido uma interpolação linear:

$$E_2 = E_1 + \frac{(f_2 - 0.30)(E_2 - E_1)}{(0.50 - 0.30)}. \quad (4.20)$$

Fluxo de Deposição

Os fluxos de deposição para areia (D_1) e lama (D_2) usados na equação de advecção-difusão Eq.4.17 são computados como:

- Para sedimento não coesivo:

$$D_1 = w_{s1}T_2 \quad (4.21)$$

No SISYPHE, o T_2 é calculado a partir da expressão a seguir:

$$T_2 = \begin{cases} \frac{1}{1-Z_f} B^R (1 - B^{(1-R)}) & \text{se } R \neq 1 \\ -B \log B & \text{se } R = 1 \end{cases} \quad (4.22)$$

Com, $B = Z_f/h$ e R é o número de Rouse (Eq.4.23), k é a constante de von Karman ($k = 0.4$), u^* é a velocidade de fricção, Z_f é a elevação do leito, h é a profundidade da água e w_{s1} é a velocidade de sedimentação.

$$R = \frac{w_{s1}}{ku^*} \quad (4.23)$$

- Para sedimento coesivo:

$$D_2 = w_{s2} \left[1 - \frac{T_1}{u_{mud}^{cr}} \right]^2 \quad (4.24)$$

Onde, u_{mud}^{cr} (m.s^{-1}) é a velocidade de deposição crítica de lama e $T_1 = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}}$.

Evolução do fundo

A evolução do fundo é calculada pelo SISYPHE através da solução da equação de Exner (Eq.4.25) da forma conservativa. Ela descreve a variação da espessura do sedimento de fundo, derivado de um simples balanço de massa e, portanto, válido para a condição de equilíbrio (Tassi e Villaret,

2014).

$$(1 - \lambda) \frac{\partial Z_f}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{Q}_b + (E - D) = 0 \quad (4.25)$$

Entretanto, por considerar apenas o transporte de sedimentos em suspensão, a evolução do leito é função do fluxo de sedimentos na vertical, então, a equação fica da seguinte forma:

$$(1 - \lambda) \frac{\partial Z_f}{\partial t} = E - D \quad (4.26)$$

Onde Q_b é o transporte de volume de fundo por unidade de largura ($m^2 \cdot s^{-1}$), com componentes Q_{bx} , Q_{by} nas direções x e y , respectivamente, Z_f é a elevação do fundo em (m) e λ é a porosidade do fundo. E e D são, nessa ordem, os fluxos de erosão e deposição de cada fração sedimentar.

Configurações do modelo morfodinâmico

Esse estudo pretende modelar o transporte de frações sedimentares muito finas, e portanto, estão fora do intervalo de aplicação das equações de transporte de fundo. Desse modo, para o desenvolvimento deste trabalho será considerado apenas o transporte em suspensão. Visto isso, as configurações adotadas para a execução das simulações para esse estudo estão expostas na tabela 4.2, e foram baseadas em estudos pretéritos que tiveram o objetivo de levantar as características sedimentares do fundo da Lagoa Mirim (Vieira, 1995; Santos et al., 2003).

Apesar da LM ser composta por um mosaico de classes sedimentares, foram escolhidas apenas duas destas classes, pois como dito anteriormente, ao considerarmos o transporte em suspensão de mistura de sedimentos o SISYPHE aceita a utilização de apenas duas classes de tamanhos. Sendo assim, a primeira implementado como não coesivo, tendo suas características vinculadas a areia muito fina, a densidade atribuída foi de $2650 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, possuindo um diâmetro médio de $65 \times 10^6 \mu\text{m}$. Já o segunda fração, foi configurada como sedimento coesivo de densidade específica de $2650 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, e com um diâmetro de $4 \times 10^6 \mu\text{m}$, um silte (Wentworth, 1922).

4.1.3. Módulo de operações de dragagem - NESTOR

O módulo NESTOR foi desenvolvido a partir da necessidade de analisar, otimizar e gerenciar os sedimentos em vias navegáveis. A utilização dele possibilita simular efeitos hidro-morfodinâmicos

Tabela 4.2 – Configuração adotadas no SISYPHE.

Período de simulação	01/01/2000 a 31/12/2004
Salvamento dos resultados	1 a cada 24 horas
Paralelismo	24 núcleos
Passo de tempo	60 s
Transporte em suspensão	Sim
Fórmula de transporte	van Rijn
Sedimentos coesivos	Não e Sim
Diâmetro médio (D_{50})	$65 \times 10^{-6} \mu m$ e $4 \times 10^{-6} \mu m$
Densidade dos sedimentos	2650 kg.m^{-3}
Fator morfológico	1

nas operações de dragagem e despejo em hidrovias fluviais, estuários e em bacias portuárias.

Quando acoplado com os modelos hidrodinâmicos (TELEMAC-2D) e morfodinâmicos (SISYPHE), é possível quantificar volumes de sedimentos e observar as alterações hidro-morfodinâmicas causadas pelas mudanças batimétricas feitas por essas operações. Essas modificações podem ser observadas nos campos de velocidades de correntes, nível, amplitudes de maré, salinidade, distribuição das classes sedimentares e mudanças nas taxas de assoreamento e erosão no ambiente modificado (Paarlberg et al., 2015; Van Maren et al., 2016; Álvarez et al., 2017; Martelo et al., 2019).

Definições de áreas operacionais

Em uma primeira etapa, devem ser delimitados os polígonos de dragagem e despejo ao longo da hidrovia que se deseja estudar. Além disso, para cada uma das áreas definidas, podem ser determinados parâmetros distintos de dragagem. Esses polígonos devem conter informações relativas ao nível d'água de referência, tempo de dragagem e volume a ser dragado para que, então, seja simulada a transformação do fundo (Fig. 4.3).

O NESTOR possibilita modelar atividades de dragagem com duas abordagens distintas: A primeira abordagem é realizada na forma de *hindcast*, ou seja, é possível reconstruir operações de dragagem que ocorreram no passado. Já a segunda, permite modelar as dragagens na forma de previsão (*forecast*), a fim de prever as necessidades exigidas pela operação que ainda vai acontecer. Sempre que um critério de escavação é atingido, uma realocação automática do material dragado também pode ser simulada. Ambas as abordagens podem auxiliar na avaliação de estratégias de operações de dragagem existentes ou então no desenvolvimento de novas estratégias (Maerker e Malcherek, 2010).

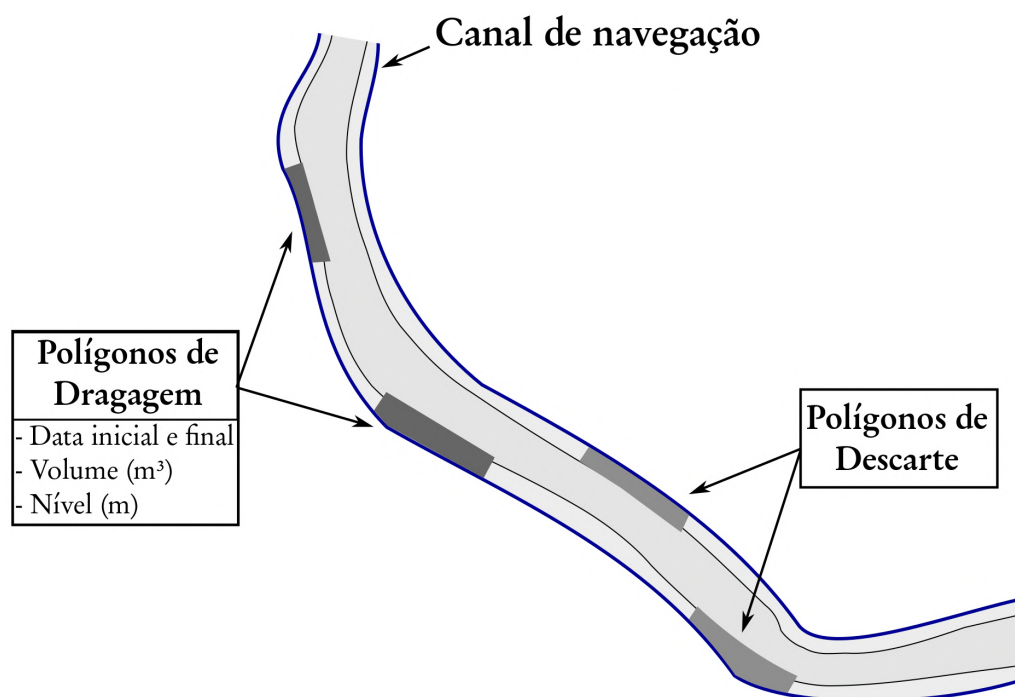


Figura 4.3 – Figura ilustrativa de delimitação dos polígonos de dragagem e descarte.

Modelagem de reconstrução de operações de dragagem (hindcast)

Para a execução desse tipo de operação é necessário definir uma data, uma hora de início e de fim de uma operação no NESTOR. Além disso, se um volume de dragagem for definido, o modelo fará alterações no fundo e uma nova profundidade dentro do polígono de dragagem será calculada em função do volume definido pelo usuário (Fig. 4.4). Dessa forma, uma correta evolução do fundo do novo canal navegável pode ser obtida considerando operações de dragagem que ocorreram durante o período pretérito (Maerker e Malcherek, 2010).

Nesta aplicação, a profundidade de dragagem resulta do volume de extração e da área de escavação definida pelo usuário, assim, o modelo assume que todos os elementos ou nós nessa superfície serão aprofundados na mesma quantidade.

Modelagem para prever atividades de dragagem (forecast)

Esse tipo de operação foi implementada no NESTOR para prever se há necessidade de dragagem, ademais, alguns parâmetros como: profundidade de dragagem (h_{drag}) e profundidade crítica (h_{crit}) devem ser definidos em cada polígono. Em cada passo de cálculo, o modelo escaneia todos os nós que estão no interior do polígono e verifica se o assoreamento reduziu a profundidade até alcançar o

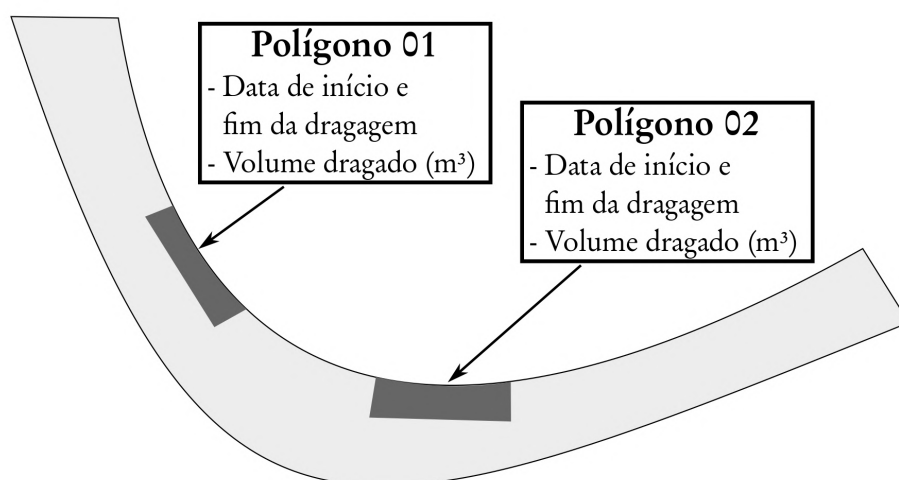


Figura 4.4 – Imagem representativa de dragagem *hindcast* em diferentes operações em uma hidrovía. Modificado de Maerker e Malcherek (2010).

valor adotado como crítico, então a operação inicia (Fig. 4.5). Ademais, sempre que um critério de escavação é atingido, uma realocação automática do material dragado também pode ser simulada.

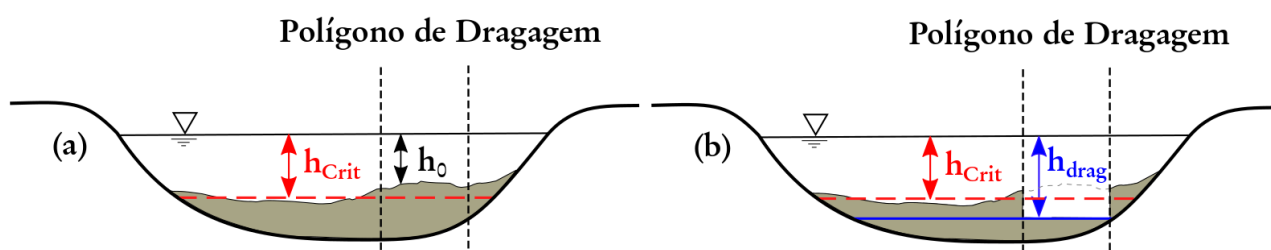


Figura 4.5 – Dragagem por critério de profundidade, h_0 é a profundidade inicial do leito. As imagens (a) e (b) são respectivamente antes e depois da atividade. Modificada de Maerker (2013).

Como resultado, a área dragada terá a sua batimetria modificada até que a profundidade de dragagem (h_{drag}) definida no critério seja alcançada. Ao concluir o processo, o NESTOR calcula o volume de material removido e o memoriza ao final da operação. Isso permite ao usuário concluir sobre a eficiência e desempenho de uma determinada estratégia de dragagem.

consequentemente, em ambos os casos, é necessário fornecer arquivos para que o NESTOR execute a tarefa. Para isso, três ficheiros são indispensáveis: (i) um arquivo geométrico com os polígonos de dragagem; (ii) um arquivo com os parâmetros utilizados na operação e (iii) um arquivo que realiza o chamamento dos três modelos, possibilitando a troca de informações entre cada um deles.

4.1.4. Acoplamento entre os modelos

O sistema de modelagem *open* TELEMAC-MASCARET possui duas formas de acoplamento. A primeira é chamada de acoplamento “externo” ou método de corrente, ou mesmo *offline*, esse consiste na inclusão de resultado de simulações feitas anteriormente. Como por exemplo, modelar a hidrodinâmica com o módulo TELEMAC-2D e adicionar ao módulo morfodinâmico (SISYPHE) o efeito das correntes. A outra maneira, é chamada de acoplamento interno (*internal coupling* ou *on-line*), que utiliza os módulos de forma interativa durante cada passo de tempo, transmitindo mudanças de parâmetros em cada passo de cálculo.

Para o estudo da morfodinâmica da LM, o módulo de transporte de sedimentos SISYPHE foi acoplado internamente com o TELEMAC-2D e em cada passo de tempo o módulo hidrodinâmico calcula e transfere ao SISYPHE as características do escoamento (velocidades de corrente U e V , a profundidade da água h e o coeficiente de atrito com o fundo Cd), que então computa o transporte de sedimentos e a evolução com o fundo. O esquema de acoplamento entre o modelo hidrodinâmico e morfodinâmico é mostrado na Fig. 4.6 A).

Para computar o efeito das operações de dragagem e despejo no ambiente, o módulo NESTOR é acoplado com o SISYPHE e o TELEMAC-2D (Fig. 4.6 B), desse modo, eles trocam informações em cada passo de tempo. Se os critérios adotados no NESTOR são atendidos, a dragagem e/ou despejo é iniciada, logo é executada a alteração no leito. Essas novas informações de fundo (dragagem ou despejo) são repassadas ao SISYPHE, que recalculando assim um nova batimetria. Por tanto, o TELEMAC-2D irá recalcular todas as suas variáveis, levando em consideração as transformações feitas pelo NESTOR.

4.2. Geração de malha

A utilização de malhas não estruturadas nos possibilita uma boa representação das características topo-batimétricas e tem uma maior flexibilidade que se ajusta com precisão a geometrias irregulares, como ocorre na Lagoa Mirim. Além disso, oferece diferentes tipos de resolução no mesmo domínio horizontal, ou seja, resolução fina em áreas particulares de interesse e grosseira em outros (ver na Fig.

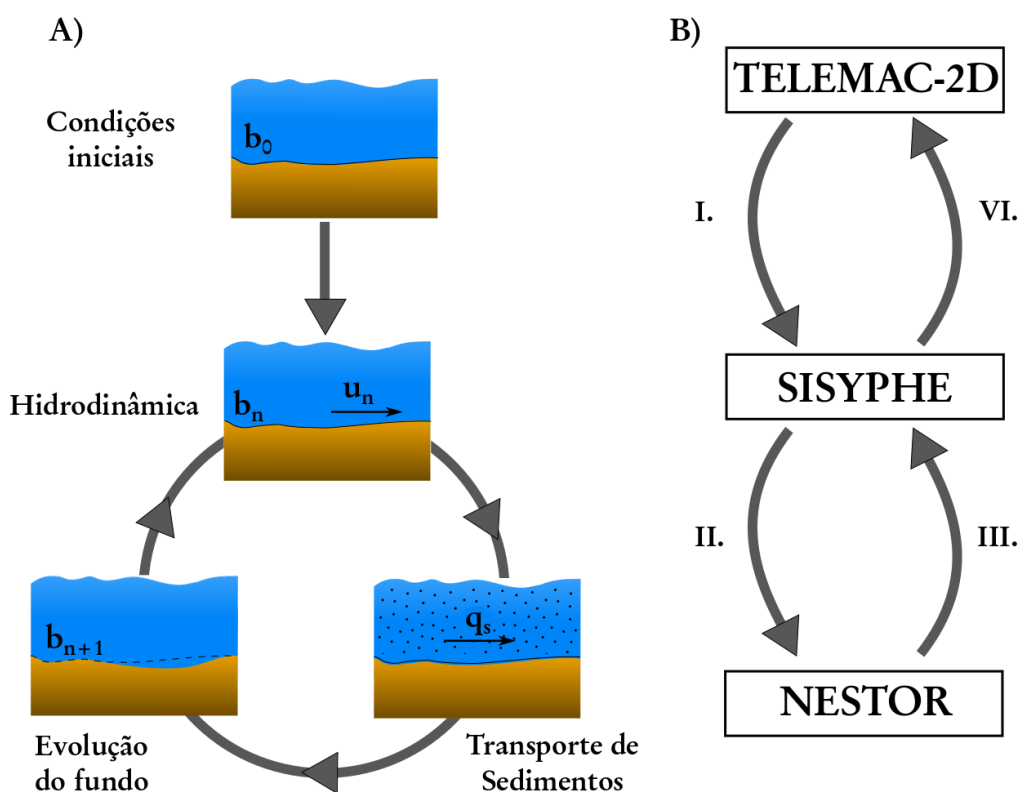


Figura 4.6 – Esquema de acoplamento entre: A) TELEMAC-2D e SISYPHE. Na imagem B) mostra o funcionamento do NESTOR: I. Os parâmetros de velocidade, profundidades e fricção são repassados ao modelo morfodinâmico; II. O SISYPHE transporta os sedimentos e evolução o fundo; III. o NESTOR ler a batimetria atualizada e faz dragagem ou despejo; VI. o SISYPHE reconstrói a batimetria e dá um novo leito para o TELEMAC-2D. Adaptado de Maerker e Malcherek (2010).

4.8). Assim, a malha não estruturada é a melhor técnica para resolver os corpos de água com regiões costeiras complexas (Bek et al., 2018).

A qualidade dos resultados computados por modelos numéricos estão diretamente relacionados a qualidade da malha computacional e aos dados batimétricos utilizados na construção da malha. Portanto, para obter uma melhor representação possível do ambiente foi necessário combinar diferentes bancos de dados batimétricos e topográficos do complexo Lagoa Mirim - Canal São Gonçalo.

As informações batimétricas foram obtidos a partir da digitalização da carta náutica nº 23.600 da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), através da ferramenta de georreferenciamento do *software* QGIS². Já as informações topográficas foram obtidas do modelo digital de elevação derivado do *Shuttle*

²www.qgis.org/pt_BR/site/

Radar Topography Mission (SRTM³). Esses dados são derivados de um radar altimétrico estereoscópico, os quais possuem uma resolução espacial de 30 m (Kunze et al., 1975). Em complemento, imagens derivadas do ERS2 Synthetic Aperture RADAR⁴ foram usadas para averiguar a correta inclusão de áreas inundáveis (Costi et al., 2016).

Os dados batimétrico foram agrupados e inseridos no software Blue Kenue para a geração da malha de elementos finitos triangulares. Esse software foi desenvolvido pelo Canadian Hydraulic Centre (2011) e é um dos programas recomendados para a construção de malhas e pós-processamento para usuários do sistema Open TELEMAC-MASCARET. O domínio computacional adotado para o desenvolvimento deste trabalho engloba a Lagoa Mirim, o Canal São Gonçalo e suas planícies de inundação.

Para este trabalho foram desenvolvidas três malhas computacionais que possuem respectivamente 88.121, 109.677 e 121.271 nós. Uma análise de sensibilidade foi realizada (ver seção 4.4) para definir a malha que melhor representação dos processos nesse domínio.

4.3. Condições iniciais e de contorno

4.3.1. Modelo hidrodinâmico

As simulações hidrodinâmicas foram executadas em escoamento no estado não permanente. O TELEMAC-2D foi forçado, utilizando informações atmosféricas (velocidade dos ventos), dados de vazão e elevações dos principais rios da região. Foram definidas quatro fronteiras líquidas abertas (Fig.4.7): rios Jaguarão, Tacuari e Cebollati e a foz do Canal São Gonçalo. E nesses contornos foram atribuídas séries temporais de vazão média diária para os rios, e de elevação para a foz do São Gonçalo, como mostra na na Fig.4.7. Os anos de 2000 à 2004 foram utilizados como fontes de dados para forçar o modelo, pois eram os únicos dados de descarga dos rios com uma resolução temporal adequada, e foram disponibilizadas pela Agência Nacional de Águas – ANA⁵.

Na superfície, o modelo é forçado pela velocidade dos ventos do conjunto de reanálise *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Interim reanalysis* (ERA Interim ECMWF⁶), esse banco de dados é considerado robusto em resolução espacial ($0,125^\circ \pm 14$ km) e temporal (6 h) (Dabernig et al., 2015). Eles foram interpolados para cada nó da malha computacional e dessa forma, todo o

³eros.usgs.gov

⁴earth.esa.int

⁵<http://hidroweb.ana.gov.br>

⁶<https://www.ecmwf.int>

domínio sofre a influência dessas condições.

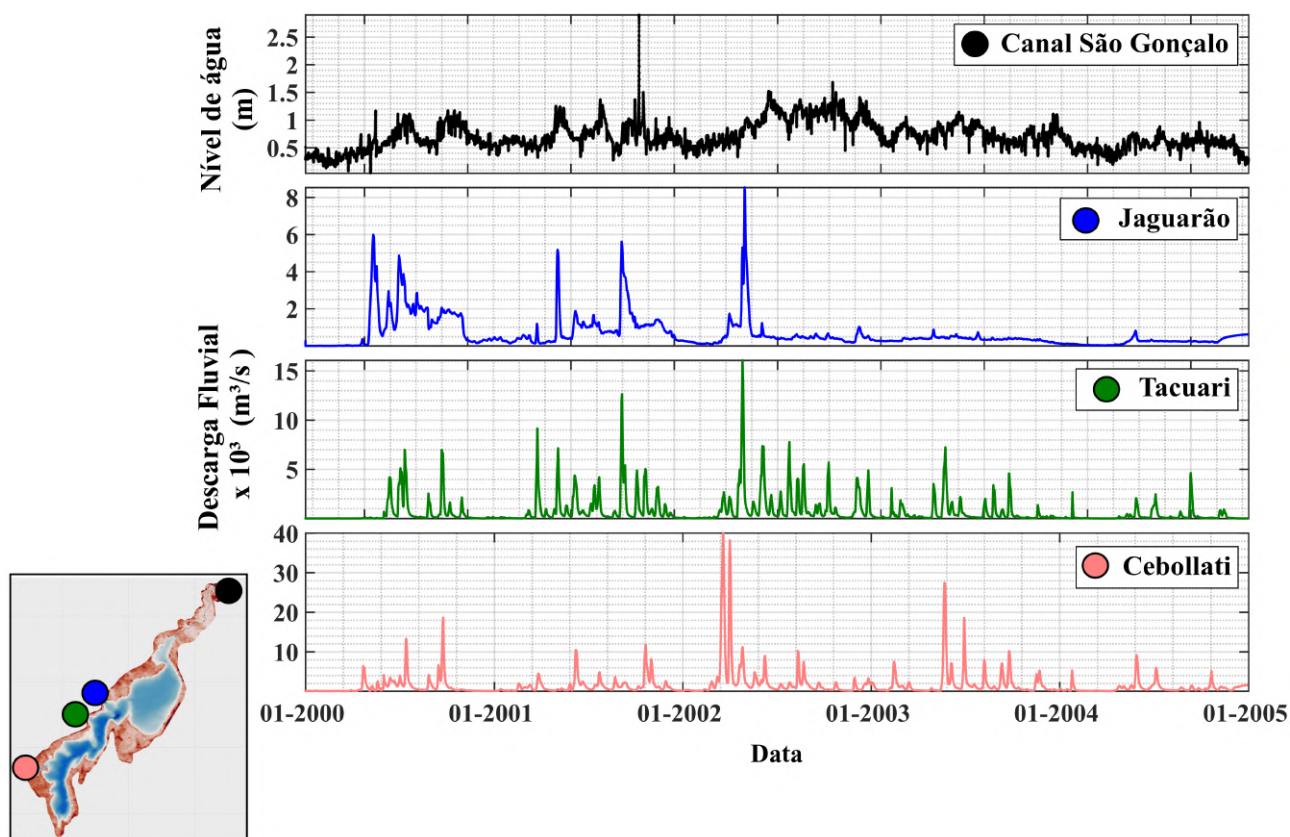


Figura 4.7 – Dados utilizados como condição de contorno nas simulações hidrodinâmicas. A linha preta se refere ao nível imposto com condição de contorno na foz do Canal São Gonçalo.

O modelo necessita de uma condição inicial ao longo de toda a grande computacional, logo, a LM inicia em repouso. Para atingir uma condição de estabilidade, foi executada uma simulação de um ano utilizando médias climatológicas nas fronteiras líquidas abertas e os resultados foram analisados apenas após esse período de estabilização.

4.3.2. Modelo morfodinâmico

Para as simulações morfodinâmicas foi escolhido o processo de transporte em suspensão de mistura de sedimentos, configurada com a formula de van Rijn et al. (2003). Foram inseridos dois tipos de sedimentos no leito da LM, um coesivo e outro não coesivo. Também foi considerado, que não há fontes de sedimentos, isso quer dizer que não há imposição de vazão sólida nos rios e que toda sedimentação ocorre devido a remobilização. Como condição inicial, não há sedimentos em suspensão na LM. Essas simplificações foram adotadas pois, não há fonte de dados/estudos hidro-sedimentológicos na LM. As configurações adotadas para as simulações estão expostas na seção 4.1.2.

4.4. Performance e validação

4.4.1. Sensibilidade de malha

Um teste de sensibilidade de malha (TSM) foi conduzido usando três diferentes malhas de elementos finitos triangulares (Fig.4.8). Apesar delas terem sido desenvolvidas englobando os mesmos limites e o mesmo domínio, elas diferem no grau de refinamento, e consequentemente no número de nós e elementos. O principal objetivo desse procedimento é investigar a independência dos resultados em relação à resolução espacial da malha.

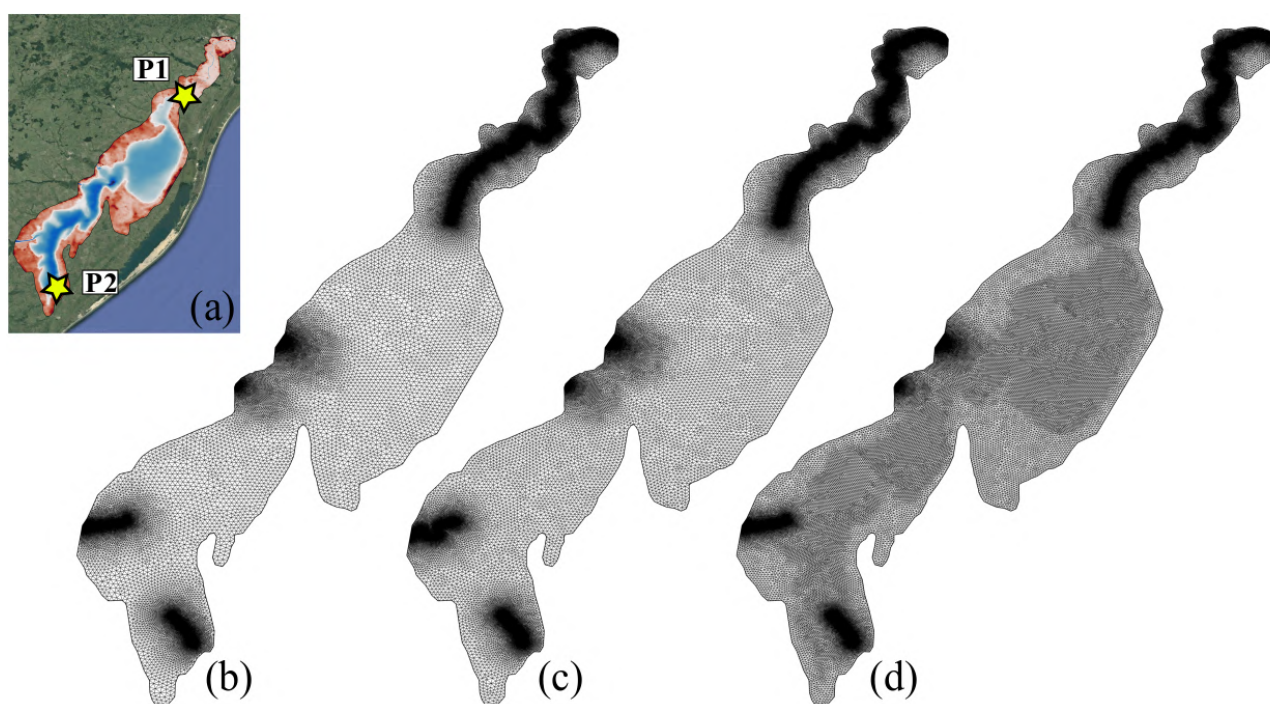


Figura 4.8 – Localização dos pontos escolhidos para essa análise (a) e malhas computacionais (b), (c) e (d).

Segundo Zoras et al. (2007), os erros numéricos são intrínsecos e relacionados à resolução das equações de momento, e podem ser minimizados através do refinamento da malha computacional. Ademais, o mesmo autor afirma que o TSM é conduzido para aumentar a confiança e medir as incertezas da modelagem. Além disso, Kirinus et al. (2018) afirma que a malha escolhida tanto deve representar adequadamente os processos ambientais, como deve manter um custo computacional razoável em termos de consumo de tempo.

Sendo assim, para fazer essa avaliação foram feitas três simulações de 2 anos cada uma delas, com 1 ano de aquecimento e 1 ano (referente ao ano de 2000) usado para esse teste. As simulações

foram executadas utilizando as mesmas condições iniciais e de contorno (seção 4.3) e as mesmas parametrizações (subseção 4.1.1). Entretanto, a diferença entre elas está na malha computacional utilizada, sendo elas expostas na Fig.4.8.

Diante disso, para analisar a sensibilidade entre as malhas foram escolhidos dois pontos em cada uma das simulações, estando eles situados no extremo sul e norte da LM (em amarelo na Fig.4.8). Os resultados de nível de água foram comparados entre si e seu erro relativo foi computado pela equação 4.27.

$$ER = \frac{|\left(\frac{\sum malha1}{n}\right) - \left(\frac{\sum malha2}{n}\right)|}{\left|\frac{\sum malha2}{n}\right|} \quad (4.27)$$

Tabela 4.3 – Diferença entre as malhas.

	Erro relativo (%)		
	Malha1-2	Malha1-3	Malha2-3
P1	6,55	7,42	6,83
P2	19,49	22,79	1,14

Pode ser observado que os maiores valores de desvio são encontrados entre as malhas 1 e 3 (7,42% e 22,79%), quando comparados com os erros encontrados entre as malhas 2 e 3 (6,83% e 1,14%). Desta forma, a malha 1 pode ser excluída da análise, pois apresenta as maiores diferenças quando comparada com as malhas 2 e 3. Já na comparação das malhas 2 e 3 foram encontrados os menores valores de erro absoluto, demonstrando que existe pouca diferença entre os resultados calculados utilizando malhas com 109.677 ou 121.271 nós para a área de estudo.

Em relação as variações entre os resultados encontrados (2-3), as tendências foram semelhantes estando dentro dos limites aceitáveis (inferiores a 7%). Portanto, a malha 3 (121.271 nós) foi escolhida para os estudos subsequentes, haja vista que não houve uma diferença demasiada no custo computacional.

4.4.2. Validação

Segundo Dias e Lopes (2006), o processo de validação é definido como o procedimento que consiste em comparar os dados de saída do modelo com os de laboratório/observações, servindo para comprovar a eficiência de modelos numéricos. No passado, as previsões para cada modelo geralmente eram qualitativamente comparadas a conjunto de dados e soluções analítica de casos idealizados. Esta comparação é tipicamente subjetiva, e de forma a encontrar uma concordância razoavelmente boa.

Todavia, a modelagem numérica é uma ferramenta de engenharia e requer uma avaliação mais objetiva (Sutherland et al., 2004).

De acordo com Sutherland et al. (2004), o desempenho de qualquer modelo pode ser avaliado calculando seu viés, acurácia e habilidade. Diante disso, para executar o procedimento de validação dos resultados, foram utilizadas métricas descritas e discutidas por Fox (1981), Brendel (1983), Pielke (2013), Narita et al. (2009), Levine e Wilks (2000) e Chai e Draxler (2014). Ademais, será dada preferência ao uso de siglas em língua inglesa para a identificação dos diversos erros e índices estatísticos, de forma a manter uma melhor conformação à literatura científica disponível atualmente. Desse modo, os seguintes indicadores foram utilizados e seus respectivos equacionamentos são mostrados na Tab. 4.4:

- **Erro Médio ou Viés:** é a medida da diferença entre as tendências centrais dos dados modelados e observados. De acordo com Sutherland et al. (2004), essa medida é muitas vezes chamada de confiabilidade. Nessa definição, o modelo pode subestimar o superestimar o dados medido, mas pode não ser necessariamente exato. Essa medida é considerada precisa e robusta, pois dá pesos iguais a todos os erros, diferentemente de outras, que penaliza as maiores variações atribuindo maior peso aos erros com valores absolutos maiores do que menores (Narita et al., 2009). Isso ocorre porque erros absolutos são elevados ao quadrado. O viés segue a ideia de quando menor o seu valor, maior concordância há entre os dados. Desse modo, quando igual a zero, a simulação é perfeita (Levine e Wilks, 2000).
- **Erro Quadrático Médio (MSE):** é similar ao Viés, entretanto é mais suscetível a grandes desvios, pois eleva as diferenças individuais ao quadrado. Se ele for igual a zero, a simulação é perfeita (Levine e Wilks, 2000).
- **Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE):** tem sido usado com uma métrica padrão para medir o desempenho de modelos numéricos, expressando a precisão dos resultados com a vantagem de que o RMSE apresenta valores do erro nas mesmas dimensões da variável analisada (Chai e Draxler, 2014). Pode-se destacar que, quanto menor seu valor, melhor a concordância entre o dado modelado e o observado.
- **Erro Médio Absoluto (MAE):** por ser menos afetado por pontos com valores anormalmente extremos (outliers), o MAE é considerado preciso e robusto como medida da habilidade de modelos numéricos em reproduzir a realidade (Fox, 1981).
- **Índice de concordância (IC):** pode variar de 0 a 1, e ser utilizado para comparar simulações e dados observados. Quanto mais próximo de 1 melhor, se for IC = 1 isso indica uma perfeita

concordância entre os dados (Brendel, 1983).

- **Coefficiente de Correlação de Pearson (r):** tem o objetivo de medir o grau de correlação linear entre duas variáveis quantitativas. Esse índice adimensional pode assumir valores entre -1 e 1. Desse modo, se r for igual a 1, pode-se dizer que há uma correlação perfeita, isso implica que o resultado modelado é idêntico ao coletado. Entretanto, se $r = -1$ então, o dado modelado não possui correlação com o dado observado (Fox, 1981).

Tabela 4.4 – Testes estatísticos utilizados para avaliar a performasse do modelo hidrodinâmico. Onde, n é o tamanho da amostra analisada, obs e mod são os dados observados e modelados, obs_{mean} e mod_{mean} são suas médias.

Medidas de desempenho	Resultados desejáveis
$Viés = \frac{1}{n} * \sum (obs - mod)$	Quanto mais próximo a 0 melhor.
$MSE = \frac{1}{n} * \sum (obs - mod)^2$	MSE = 0, indica uma simulação perfeita.
$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (obs - mod)^2}{n}}$	Quanto mais próximo a 0 melhor.
$MAE = \frac{1}{n} * \sum obs - mod $	Quanto mais próximo a 0 melhor.
$IC = 1 - \frac{\sum (obs - mod)^2}{\sum (mod - mod_{mean} + obs - obs_{mean})^2}$	Se IC = 1, indica uma simulação perfeita; se IC $\rightarrow$ 0, o resultado do modelo é inaceitável.
$r = \frac{n \sum (obs * mod) - (\sum obs) * (\sum mod)}{\sqrt{n \sum obs^2 * (\sum obs)^2} * \sqrt{n \sum mod^2 * (\sum mod)^2}}$	Quanto mais próximo a 1, indica uma melhor correlação linear entre os dados.

Diante disso, a validação do modelo hidrodinâmico TELEMAC-2D consistiu em comparar os resultados obtidos através de 5 anos de simulação (2000-2004), com dados coletados *in situ* em duas estações de monitoramento dentro da LM. Esses dados foram medidos por Régua Linimétrica instaladas nos Portos de Santa Izabel (SI) e de Santa Vitória do Palmar (SVP) e são disponibilizados

pela Agência de Desenvolvimento da Lagoa Mirim⁷.

A Fig. 4.9 mostra os resultados da simulação (linha preta contínua) e os registros das estações de SI e SVP (pontos cinza) utilizadas para validar o modelo hidrodinâmico. Como a batimetria LM e os indicadores de nível de água dos portos SI e SVP não são referenciados ao mesmo dado vertical, a validação foi feita através da remoção da média global das observações de nível e dos resultados simulados.

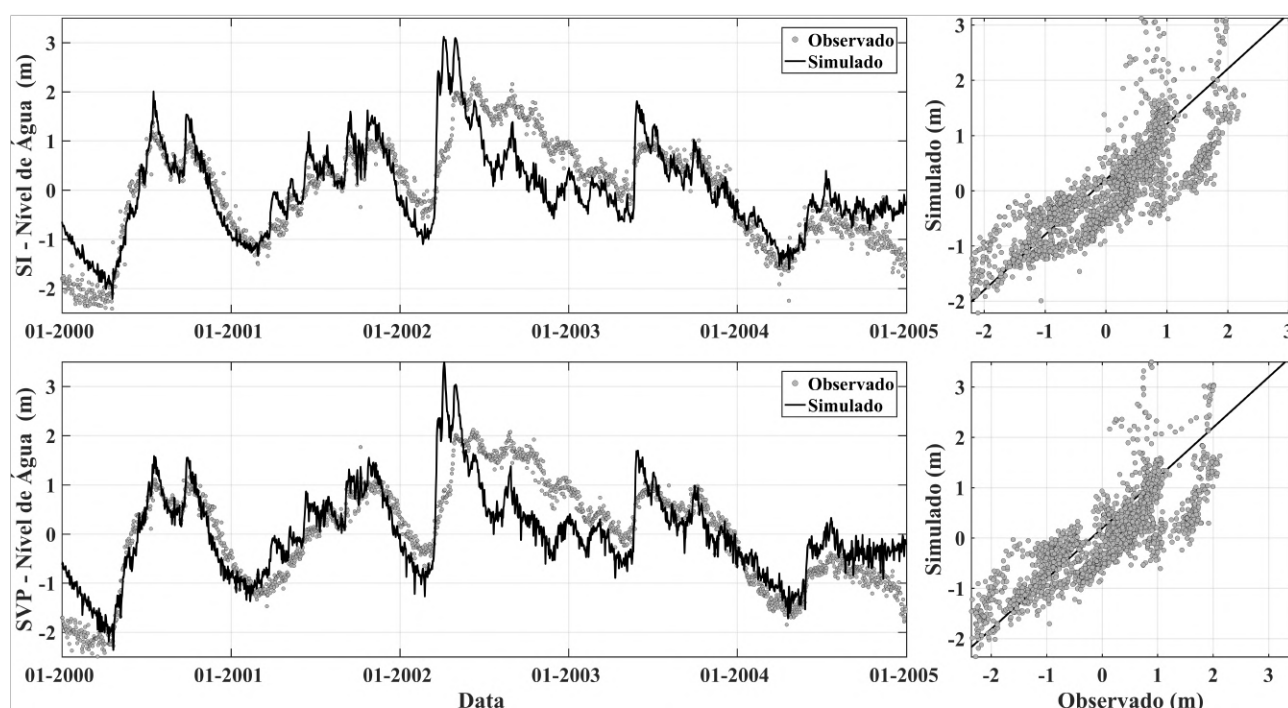


Figura 4.9 – Comparação entre os níveis simulados e observados nas estações de SI e SVP (a esquerda) e seus respectivos coeficientes de correlação (a direita).

Como é observado na 4.9, as séries temporais mostram uma boa concordância, e durante os 5 anos de simulação o TELEMAC-2D foi capaz de representar com precisão a variabilidade e os padrões sazonais do nível de água nos extremos da LM. Todavia, durante o ano de 2002, os níveis de água simulados aumentam e diminuem mais rapidamente que os dados medidos. Segundo (Costi et al., 2018), essa observação pode ser causada pela alta precipitação nesse ano, bem como pode indicar a importância das trocas entre o LM e outras massas de água, como o Lagoa Mangueira, que nesse estudo foi negligenciado por falta de dados batimétricos desse corpo hídrico.

Embora as séries temporais forneçam uma boa concordância visual, Sutherland et al. (2004) afirma, que é necessário avaliar quantitativamente o desempenho de modelos numéricos para a obtenção

⁷<http://wp.ufpel.edu.br/alm/>

de uma melhor compreensão dessa comparação. As equações usadas para computar essas métricas foram apresentadas anteriormente na 4.4, e os resultados obtidos são apresentados a seguir na Tab. 4.5.

Tabela 4.5 – Validação do modelo hidrodinâmico.

Estações de Medição	Viés	RMSE	MSE	MAE	IC	r
SI	$1,92 \times 10^{-15}$	0,59	0,35	0,46	0,90	0,82
SVP	$-1,60 \times 10^{-16}$	0,75	0,38	0,49	0,89	0,80

O Índice de Concordância (IC) de Brendel (1983) determina a exatidão do modelo utilizado, e avalia o grau de afastamento entre os valores estimados e observados. Desse modo, vale destacar o bom desempenho da simulação, dado que foi encontrado IC = 0,90 para SI e IC = 0,89 para SVP. Corroborando com isso, foi obtido um grau de correlação forte ($r \geq 0,8$) entre as séries temporais (van Rijn et al., 2003), dessa maneira, conseguimos atestar que o TELEMAC-2D demonstrou um bom desempenho em representar a condição hidrodinâmica média do ambiente.

De acordo com a Tab. 4.5, os resultados apresentam baixos valores de RMSE, com destaque para a estação de SI (0,59 m), que obteve resultados próximos aos de (Costi et al., 2018) (RMSE = 0,50 m). Quanto ao MSE, ele apresentou valores baixos, com respectivamente 0,35 m e 0,38 m para as estações de SI e SVP, indicando uma boa concordância entre a simulação e o observado. Uma vez que, quanto menor o valor do MSE, mais próximas estão as duas séries de uma linha de melhor ajuste e corroborando com as métricas apresentadas anteriormente. Podemos destacar, que esses valores estão abaixo dos encontrados por Silva et al. (2019) (MSE = 1,07 m). Portanto, podemos afirmar que o modelo teve acurácia em reproduzir as condições observadas. Como era esperado, o erro quadrático médio (RMSE) foi maior do que o MSE, uma vez que essa medida atribuiu maior peso a erros com valores absolutos maiores do que a erros com valores absolutos menores.

Estes resultados demonstram que o modelo hidrodinâmico foi bem sucedido em representar a variabilidade temporal do nível da água da LM. As análises estatísticas de desempenho indicaram que o modelo hidrodinâmico TELEMAC-2D está validado, e pode reproduzir adequadamente as tendências observadas em diversos pontos do corpo Lagunar.

4.5. Cenários de dragagem e despejo

Serão investigados diferentes estratégias operacionais, com o objetivos de definir uma abordagem que reduza as quantidades e as periodicidades entre as operações de dragagem e despejo. Para isso, serão analisados diferentes cenários, o primeiro deles é o proposto pelo DNIT (2014) e mais outros

seis, estando todos eles expostos na tabela 4.6. De acordo com o DNIT (2014) os canais de navegação devem possuir 3,0 metros de profundidade, que é a soma do calado (2,5 m) somado com a folga sobre a quilha da embarcação (0,5 m). Esse folga é também chamada de “sobredragagem” ou *clearance*, e é utilizada para garantir a segurança na navegação até que aconteça a próxima operação.

Os processos de dragagem e despejo serão analisados de maneira isolada, tendo sempre o Dr30D300 como o de referência. Nesse sentido, primeiro será investigado se maiores sobredragagens nos canais provocarão uma redução nos volumes de material dragado, então, está sendo proposta três outras estratégias dragagem dentro da LM (Tab.4.6).

Já a análise do procedimento despejo será feita com o objetivo de investigar se os sedimentos dragados e despejados retornarão aos canais de navegação, e quanto a distância do despejo influencia nos volumes de sedimentos dragados dos canais em médio prazo (anos). As estratégias propostas para essa investigação, serão simuladas com uma profundidade de canal de 3 m (padrão local segundo o DNIT (2014)) e sítios de despejo em diferentes distâncias do canal.

Tabela 4.6 – Configurações dos cenários de dragagem e despejo.

Processo Investigado	Nome	Profundidade de Dragagem (m)	Distância do Despejo (m)
Dragagem	Dr30	-3,0	X
	Dr35	-3,5	X
	Dr40	-4,0	X
Despejo	Dr30D300	-3,0	300
	Dr30D500	-3,0	500
	Dr30D700	-3,0	700
	Dr30D1000	-3,0	1000

A influência de cada uma dessas estratégias mostradas nas Figs. 4.11 e 4.10, serão avaliadas através de comparações entre séries temporais de evolução de fundo, pelo cálculo de taxas de sedimentação e pelos volumes de dragagem. Essa análise tem o objetivo de identificar a melhor estratégia de dragagem e despejo para a redução dos volumes removidos em futuras operações de manutenção dos canais de navegação.

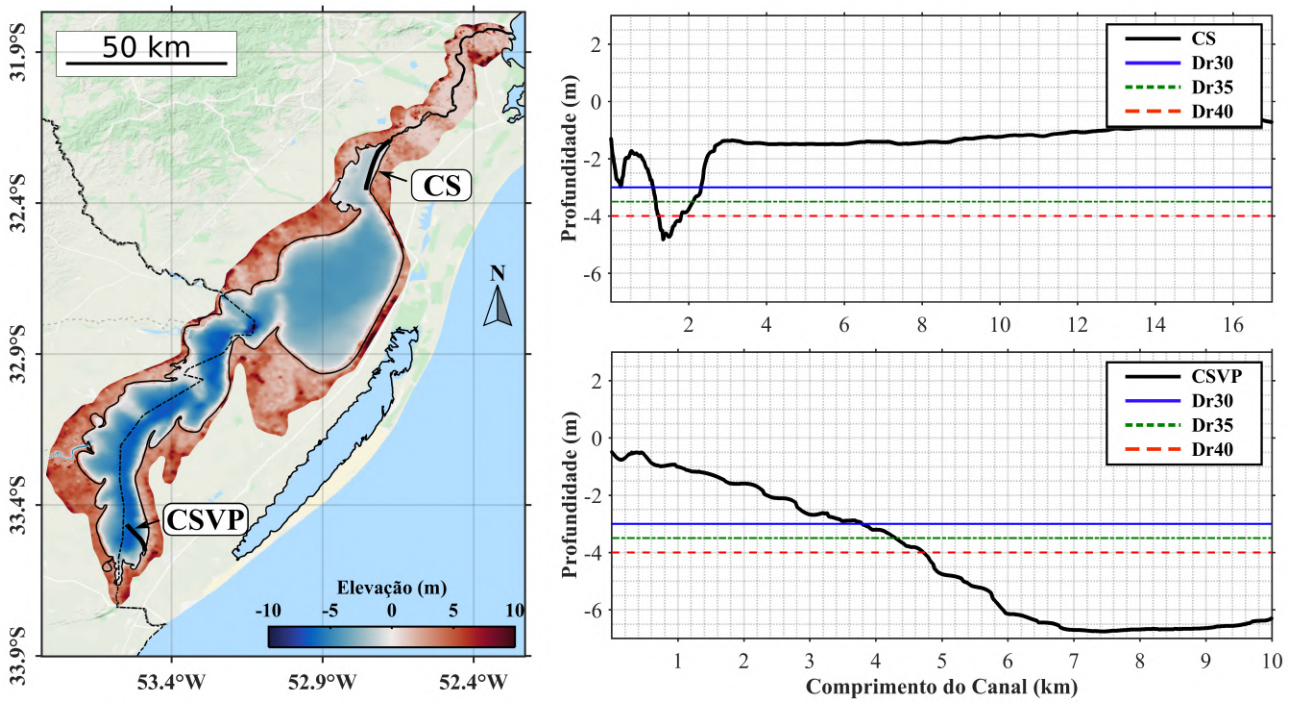


Figura 4.10 – Cenários com diferentes profundidade nos Canais do Sangradouro (CS) e Santa Vitória do Palmar (CSV).

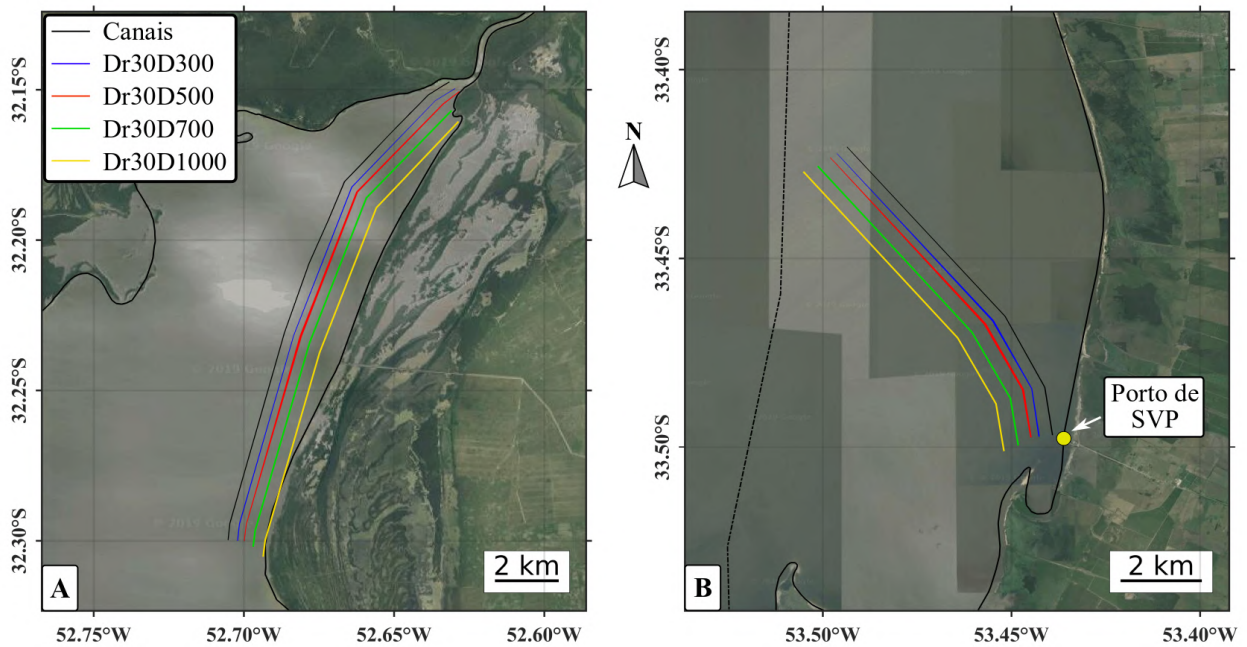


Figura 4.11 – Cenários de despejo do material dragado dos canais A) do Sangradouro (CS) e B) de Santa Vitória do Palmar (CSV).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O estudo da hidrodinâmica, transporte de sedimento, morfodinâmica e de diferentes estratégias de dragagem e seus impactos foram realizados através de simulações numéricas que consideram condições iniciais, de contorno e configurações apresentadas no capítulo anterior. Com o intuito de ilustrar os processos hidrodinâmicos dentro da Lagoa Mirim, primeiramente, serão apresentados os resultados desse estudo. Na sequência, serão apresentados os resultados do transporte de sedimentos e morfodinâmica. No final do capítulo serão apresentados os resultados das operações de dragagem.

5.1. Aspectos hidrodinâmicos da Lagoa Mirim

5.1.1. Descarga

Baseado nos dados de descarga dos principais afluentes da LM disponibilizados pela Agência Nacional de Águas (ANA) e resultados de modelagem numérica, foi possível estudar a variabilidade temporal e contribuição em volume de água que entra e sai do sistema da LM. A Fig.5.1A mostra as séries temporais para cada um dos principais rios que abastecem a LM (rios Jaguarão, Tacuarí e Cebollati). O valor máximo de descarga foi de aproximadamente $40.000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ no rio Cebollati, enquanto que a máxima dos rios Jaguarão e Tacuarí foram de $8.535,22$ e $16.081,84 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, respectivamente. As vazões médias calculadas foram de $1.558,18 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ para o Cebollati, $725,50$ e $642,80 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ para o Tacuarí e Jaguarão, nessa ordem.

A partir dessa análise, foi relatado que o rio Tacuarí, dentre os afluentes analisado, foi o que menos contribuiu em vazão para a LM. No entanto, os maiores valores foram observados no rio Jaguarão, logo, ele foi o que mais colaborou em termos de vazão durante o período analisado. Os resultados mostram que ele contribuiu com $53,24\%$, em média, podendo chegar até a mais de 90% da vazão total que entra na LM (Fig5.1B), isso ocorre principalmente em períodos de fortes chuvas na bacia uruguaia. Portanto, é possível afirmar que esse afluente é a mais importante fonte de água do sistema LM-CSG.

Também foi verificado que os maiores valores de descarga são observados entre o final do outono e o início da primavera, refletindo o típico sinal sazonal de precipitação e descarga dos rios da região de estudo (Marques, 2012; Costi et al., 2018). De uma maneira geral, são observados picos de vazão entre os meses de maio até setembro, seguindo o padrão encontrado para os rios Jacuí e Taquari (Vaz et al., 2006; Oliveira et al., 2015).

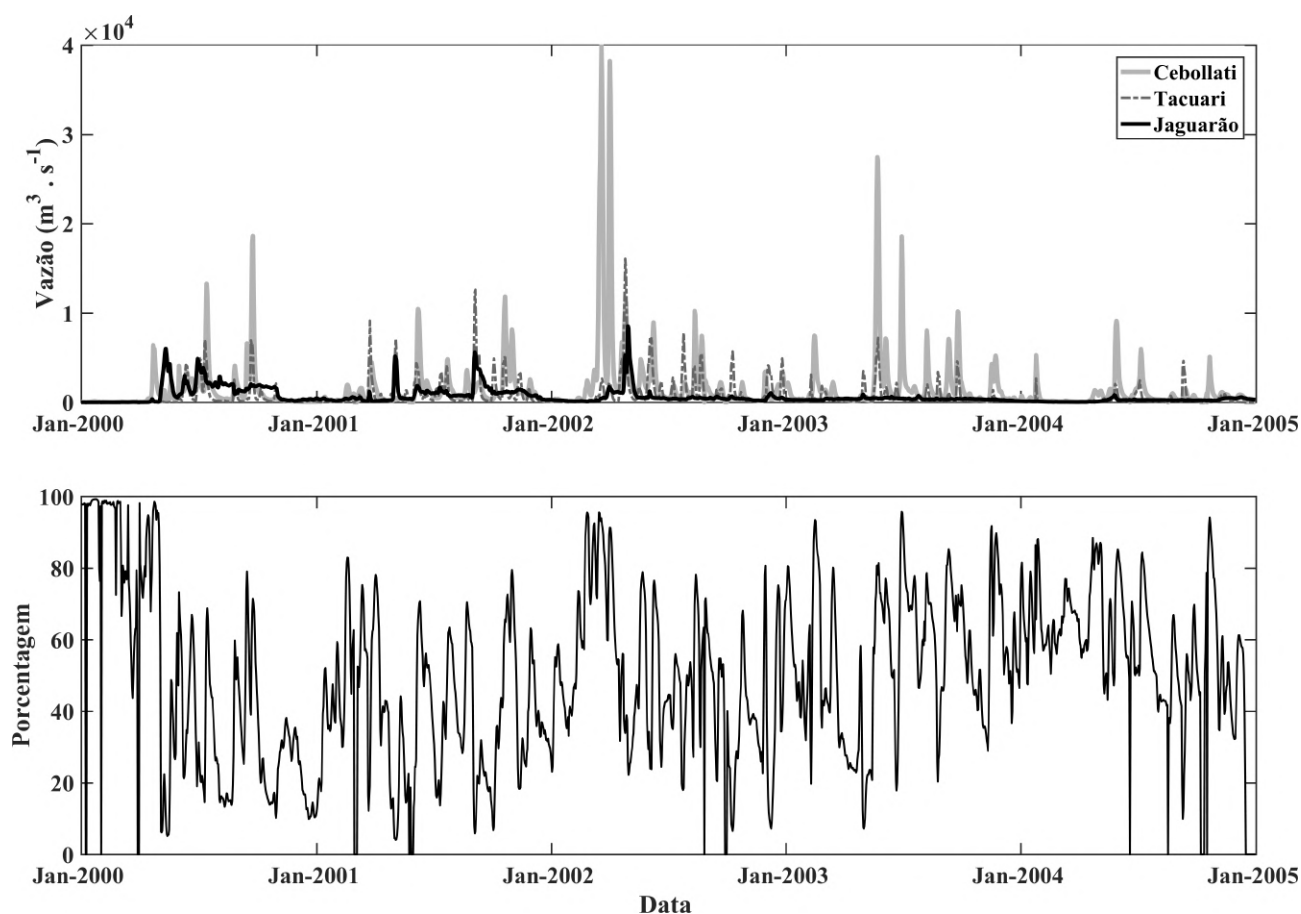


Figura 5.1 – (A) Descarga dos rios Jaguarão, Tacuari e Cebollati para a LM. (B) Contribuição de água doce do rio Cebollati para a Lagoa Mirim em porcentagem durante todo o período simulado (2000-2004).

Segundo Costi et al. (2018), a bacia hidrográfica do sistema LM-CSG mostra um padrão temporal que é intermediário entre as bacias de drenagem vizinhas. Pois, na bacia de drenagem da Lagoa dos Patos, os picos de descarga dos rios ocorrem no verão e primavera (Moller et al., 1996), enquanto que nos rios da bacia do La Plata ocorrem picos de descarga no outono e primavera (Piola et al., 2005). Ademais, Oliveira et al. (2015) afirma que a descarga de água doce para a LM é influenciada por eventos climáticos, podendo ser observadas anomalias positivas de precipitação durante eventos de El Niño e negativas em La Niña (Barreiro, 2010; García-Rodríguez et al., 2014). Hirata et al. (2010) também observou a influência desses eventos na região da LM, corroborando as mais altas taxas de descarga encontradas durante o ano de 2002 (El Niño).

De acordo com Maier et al. (2016) a diferença entre os valores de descarga encontrada entre ambas as bacias são possivelmente relativas ao distinto padrão de precipitação que ocorrem nelas. Ademais, Möller et al. (2001) afirma que a passagem de frentes frias e de ciclones extratropicais são

os principais processos que causam precipitação na região. Logo, tais frentes frias chegam a bacia de drenagem do Rio Cebollati primeiro do que nas bacias do Rio Tacuarí e Jaguarão, nessa ordem, o que habitualmente gera eventos de precipitação mais severos na primeira. Adicionalmente, de acordo com Munar et al. (2018) a sub-bacia do Rio Cebollati é maior do que as dos demais rios. Portanto, isso pode explicar a maior contribuição em volume de água do Rio Cebollati em relação aos outros afluentes da LM, como também esclarece o fato de que a maioria dos picos de descarga ocorrem neste primeiramente. A partir de um estudo de modelagem hidrológica e hidrodinâmica, Munar et al. (2018) também observou que o Rio Cebollati é o principal tributário da LM, de modo que, foi computado que esse afluente contribuiu com mais de 40% do volume total durante os anos de 2005, 2009 e 2010.

Com base nos dados de descarga disponibilizados pela ANA e obtidas pelo modelo hidrodinâmico, foi possível calcular o balanço entre as vazões que entram e saem do domínio da LM, como é apresentado pela Fig.5.2. As Figs.5.2B e 5.2C mostram, respectivamente, as séries temporais de descarga que entram e saem da LM e suas respectivas médias. Com base nesses dados foram calculadas médias mensais de descarga para as duas séries e os resultados são apresentados na Fig.5.2A.

A vazão calculada para o CSG oscilou entre os valores de $168 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e aproximadamente $3.440 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, enquanto que a média calculada para todo o período foi de $1640 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. De acordo com o CLM (1970) a média de descarga da LM é de $700 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, com picos de até $3.000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ durante condições de enchente. Conforme a Secretaria do Meio Ambiente do Estado do Rio Grande do Sul, a descarga anual média da Lagoa em torno de $395,91 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, com vazão mínima de $41,98 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ em janeiro (SEMA, 2006). Portanto, os resultados encontrados nesse trabalho estão dentro dos padrões também encontrados por outros autores em estudos anteriores (Machado et al., 2010; Oliveira et al., 2019).

Pode-se notar na Fig.5.2A que ocorrem altas taxas de descargas durante quase todo o ano, exceto no verão. Desse modo, exibindo um molde sazonal onde as maiores descargas ocorrem entre o outono e inverno e início da primavera, principalmente nos meses de Abril a Outubro. Esse comportamento é exibido tanto para os rios (entrada do sistema), quanto para o CSG (saída de água do sistema). Sendo também observado nos principais afluentes da LP, que de acordo com Marques (2012) os menores valores de descarga ocorrem de Novembro a Junho enquanto que os mais altos ocorrem de julho a Outubro.

Entretanto, é possível observar a defasagem entre os valores de inputs e output expostas nas Fig.5.2 tendo o primeiro com valores bem superiores ao segundo. Visto isso, foi estimado a entrada de volume em média é aproximadamente $3.000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e sai através do CSG é inferior a $2.000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

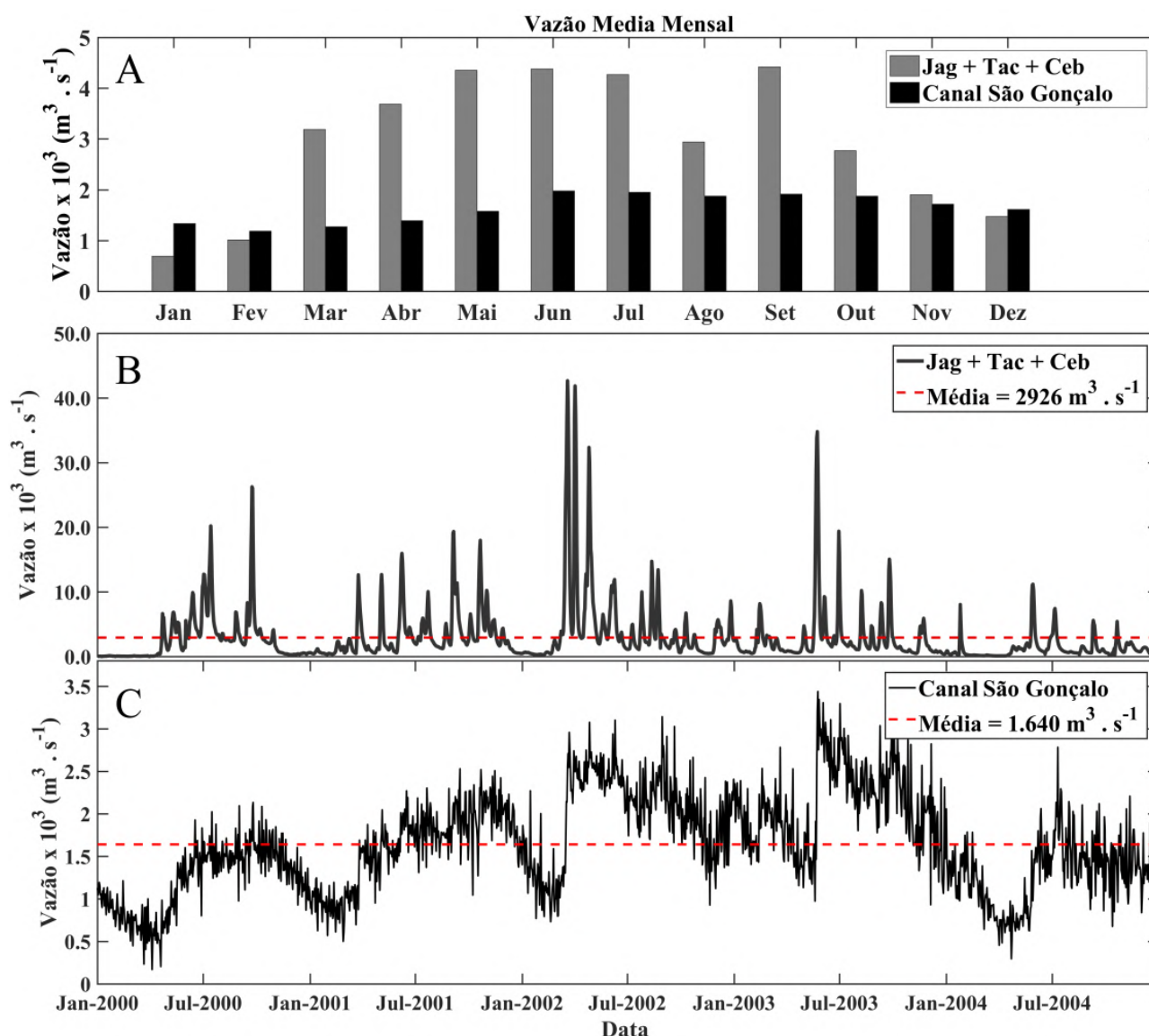


Figura 5.2 – (A) Média mensal de descarga que entra e sai da LM (2000-2004). (B) Séries temporais de Vazão que entra na LM (Jaguarão + Tacuarí + Cebollati) (linha preta) e sua média (linha vermelha pontilhada). (C) Série temporal de descarga calculada para o Canal São Gonçalo (em preto) e sua média (em vermelho).

de água, sendo que essa diferença é ainda maior quando observamos os períodos de altas vazões, onde a diferença pode chegar até aproximadamente $3.000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ entre a entrada e saída de água da LM em certos períodos (inverno), isso pode ser observado na Fig.5.2A. Esses valores também foram observados por Hirata et al. (2010), Oliveira et al. (2015) e Oliveira et al. (2019).

Com base na análise feita anteriormente a LM estoca uma grande quantidade de água ao longo do ano, dessa forma podemos afirmar que ela se comporta como um grande reservatório, corroborando com as análises feitas por Hirata et al. (2010) e Oliveira et al. (2015). Nesse sentido, Costi et al. (2018)

destaca três fatores que contribuem com esse comportamento: a alta descarga dos tributários durante a maior parte do ano, a configuração estrangulada da LM conectada ao CSG e a incidência predominante de ventos de nordeste. Ademais, Silva et al. (2019) afirma que esse fatores tanto colaboram com o aumento do tempo de residência das suas águas, como também contribuem para o estabelecimento de um desnível do nível de água entre o sul e o norte dessa laguna.

As séries temporais de descarga calculadas para o CSG indicam que esse é um sistema físico governado por uma amplitude de escalas de tempo. No entanto, o sinal de descarga é altamente influenciado por variabilidades de médio/longo período associadas com a descarga dos principais afluentes da LM. Então, para investigar as principais escalas temporais nas quais os processos ocorrem na série temporal de descarga do CSG uma análise utilizando ondaletas foi executada. De acordo com Marques (2012), esse método localiza variações de energia em séries temporais discretas em uma variedade de escalas e fornece o espectro de energia local e global.

Visto isso, a Fig.5.3 mostra o espectro local e global de potência para a correlação cruzada entre a vazão do CSG, vazão dos rios (Jaguarão + Tacuari + Cebollati) e a intensidade do vento. A análise dos espectros locais de energia (Fig.5.3B e 5.3E) indicam em geral dois principais grupos que controlam a escala de tempo da descarga da LM.

No primeiro grupo (Fig.5.3B) a correlação cruzada com ondaletas do tipo Chapéu Mexicano indica que existe processos que ocorrem com periodicidade entre 64 e 300 dias, indicando que a descarga dos rios controlam a oscilação da descarga do CSG nas escalas de tempo intra-sazonais, sazonais e anuais. Esse intervalo mantém prevalência na energia do espectro por todo o período estudado, entretanto, em dois momentos ocorrem eventos de alta correlação associando a variações em escalas de até 8 dias (início do ano de 2002 e metade de 2003), entretanto, esses eventos não são representativos sobre a amostra. Essa afirmação é corroborada pelo espectros globais de potência entre a descarga dos rios e a descarga do CSG (Fig.5.3C), onde a linha tracejada de 95% de confiança demonstra significativamente que somente períodos acima de 64 dias são representativos dentro dos dados comparados. Processos com períodos entre 64 e 300 dias refletem a resposta de longo prazo da dinâmica de chuvas na Região sul do Brasil, apresentando um ciclo quase anual como o mais importante.

Por outro lado, no segundo grupo (Fig.5.3E) a influência do vento ocorre em escalas menores de tempo, com amplitude entre 2 e 15 dias. Ambos os grupos de escalas de tempo, são responsáveis pelo aumento e diminuição da vazão da LM. Os espectros globais de potência das séries temporais de descarga filtrada e vento (Fig.5.3F) indicam a importância desses processos combinados nas diferentes

escalas de tempo para a complexa ação dessas forçantes na região de estudo. Estes processos estão intrinsecamente relacionados com passagens de frentes frias e a modulação de ventos locais, que pode potencializar o aumento da descarga do CSG.

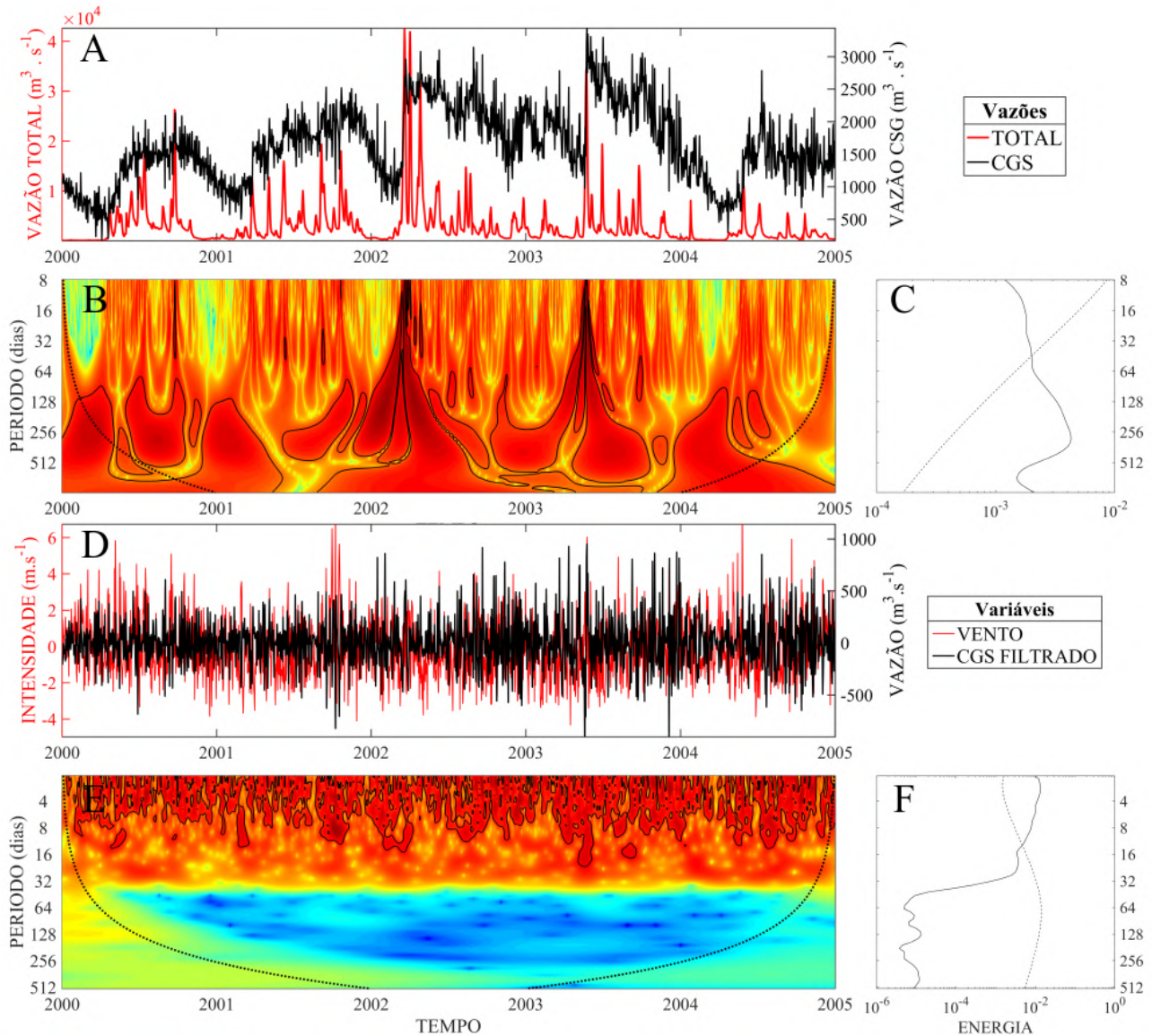


Figura 5.3 – (A) Séries temporais de Vazão total (Jaguarão + Tacuarí + Cebollati) em vermelho e vazão calculada da LM para o CSG e (B) Espectro cruzado de energia usando a ondaleta Chapéu Mexicano. A região dentro do contorno da linha pontilhada tem 95% de confiança e indica o cone de influência onde os efeitos de borda são importantes. (C) Espectro de energia integrado no tempo. A linha pontilhada representa um nível de confiança de 95%. (D) Séries temporais de intensidade dos ventos (vermelho) e vazão (preto). Ainda nesse quadro (D), a série temporal de vazão foi filtrada usando um filtro do tipo lanczos com um período de corte de 30 dias. (E) Espectro local de energia utilizando ondaleta do tipo Morlet. (F) Espectro de energia da ondaleta integrado no tempo. A linha pontilhada representa 95% de confiança.

Essa região é fortemente influenciada pela passagem de sistemas meteorológicos frontais, que geram rápidas mudanças na direção dos ventos, sendo dessa forma responsáveis pelos processos que ocorrem em menores escalas de tempo. Ademais, a presença do Anticiclone Atlântico Sul e ciclone com origem polar contribuem para a alta variabilidade temporal da circulação do vento (Parise et al., 2009). Dinamicamente, os ventos do quadrante sul empilham água ao norte da LM, ocasionando uma diminuição da vazão desta laguna e fazendo com que os níveis observados sejam maiores em Santa Izabel (extremo norte da LM - P1 na Fig.4.8), enquanto ventos N-NE aumentam os níveis na porção sul e favorecem o escoamento através do CSG. Estudos anteriores utilizando análise de séries temporais e modelagem numérica também mostraram a influência da circulação induzida pelo vento sobre a região de estudo, cujos ciclos de variabilidade vão de 3 a 16 dias que foram sempre coincidentes com a passagem de sistema meteorológicos (Möller et al., 2001; Fernandes et al., 2004, 2005; Marques et al., 2011; Marques, 2012).

Essas análises sugerem que a LM se comporta como um sistema semi-fechado e é dominado pela descarga dos seus afluentes em longas escalas de tempo e é modulada pela ação dos ventos em escalas menores. Dessa forma, se comportando de forma análoga a outras lagunas costeiras ao redor do mundo, cuja conexão com o mar é restrita e feita apenas por uma desembocadura. Umgieser et al. (2014) ao comparar a hidrodinâmica de 10 lagunas do Mediterrâneo, mostraram que esses tipo de laguna tem processos de troca que não são significativamente influenciadas pelo vento. Estudos anteriores mostram que lagunas costeiras são influenciadas dinamicamente por processos que atuam em diferentes escalas de tempo, estando de acordo com trabalhos realizados por Costi et al. (2018) e Oliveira et al. (2019) na LM e por Möller et al. (2001), Barros e Marques (2012) e Marques (2012) na LP.

5.1.2. Nível de água

Variabilidade Temporal

Como visto anteriormente, a descarga dos rios e os ventos são forçantes que podem alterar a hidrodinâmica da LM e consequentemente gerar alterações na elevação do seu nível de água.

Sendo assim, a Fig.5.4 mostra a variabilidade do nível de água para os setores norte, central e sul da LM calculado pelo TELEMAT-2D. Nesta figura fica constatado o mesmo padrão de comportamento apesar de estarem em diferentes setores da laguna, além disso, as oscilações do nível de água apresentam um comportamento que responde ao sinal de variabilidade das descargas dos afluentes que deságuam nessa laguna (ver na Fig.5.1.1B).

Adicionalmente, foi constatado que o nível de água reflete o típico sinal sazonal de precipitação e descarga observados na região (ver na Fig.5.2A), de modo que os maiores níveis ocorrem do outono ao início da primavera. Desse modo, concordando com os resultados encontrados por Costi et al. (2018), Munar et al. (2018) e Silva et al. (2019) para essa mesma laguna. Esse comportamento é semelhante ao observado para outras bacias localizadas nas proximidades da região estudada, como as bacias da Lagoa dos Patos (Barros e Marques, 2012; Pasquini et al., 2012) e do Rio da Prata (Piola et al., 2005).

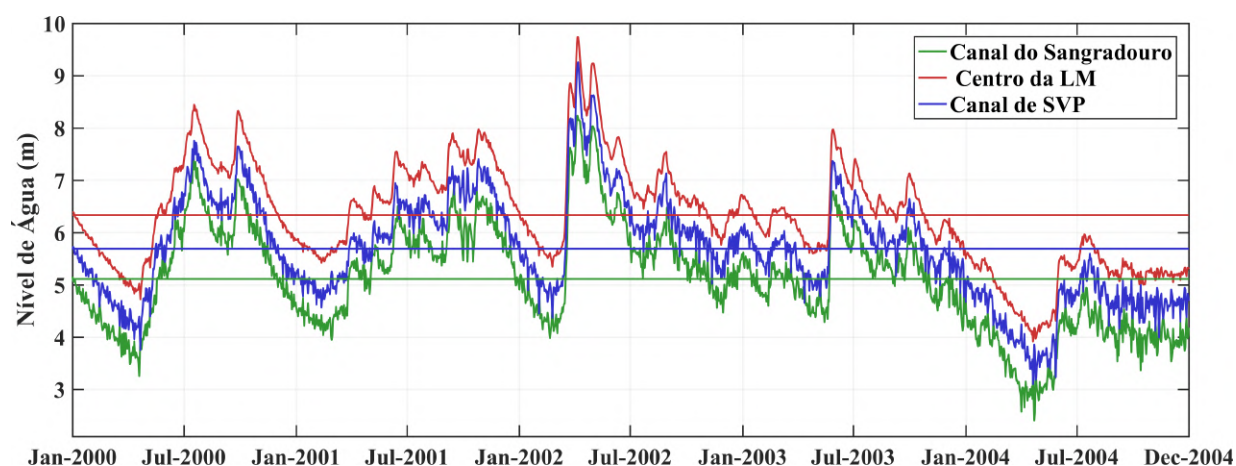


Figura 5.4 – Séries temporais de nível de água na LM. Os pontos P1, P2 e P3 estão localizados no Canal do Sangradouro no norte, região central e no Porto de Santa Izabel no sul da LM.

O nível médio da água calculado pelo modelo para a região norte da LM (Canal do Sangradouro, ver Fig. 1.2) é de 5,1 m acima do referencial batimétrico de nível, variando entre 2,4 m e 8,2 m. Para a região central (em vermelho na Fig.5.4), a média é de 6,3 m, com oscilações entre 3,9 m e 9,7 m, enquanto que para a região sul (Canal de SVP) o nível médio de água é de 5,6 m e variando de 3,1 m e 9,2 m. Os maiores níveis foram verificados na região central da LM e são relacionados a batimetria mais profunda. Por outro lado, a diferença de nível médio computado entre os setores norte e sul é relacionado ao efeito da persistência dos ventos que sopram de nordeste, cuja influência provoca um empilhamento de água na região sul da laguna.

As séries temporais mostram que os níveis são bastante variáveis durante toda simulação, de forma que o nível aumenta e diminui de maneira relativamente rápida. A oscilação máxima no nível de água foi computada entre o início do outono e o inverno, chegando a oscilar cerca de 4 m durante esse período, o que pode ser explicado pela alta descarga de água pelos tributários da LM durante esse mesmo período (ver na Fig.5.1.1B). De acordo com Kjerfve e Magill (1989), chuvas intensas e o alto escoamento de água doce têm impactos profundos nos níveis de água nas lagoas costeiras. Durante

os períodos de grande precipitação, o nível da água pode aumentar rapidamente e causar inundações extensas na região costeira adjacente, como é observado por Costi et al. (2018) ao estudar a persistência da inundação nas áreas úmidas em relação as anomalias de nível de água na LM e CSG.

De acordo com Hirata et al. (2010), os níveis de água da LM são influenciados por eventos de El Niño, que aumentam a precipitação na região. Esse autores reportaram variações maiores do que 5 m no nível de água ao analisar séries temporais de 1912 a 2002. Em uma análise de séries temporais de 3 anos de nível de água para três estações da LM, Oliveira et al. (2015) observaram um aumento de aproximadamente 2,5 m no nível de água da laguna para condições de alta precipitação. Nesse sentido, Oliveira et al. (2019) em um estudo de modelagem relatou que as oscilações de nível da LM podem ser maiores do que 3 m durante os períodos de outono e inverno. Ademais, embora a LM se assemelha a LP em termos geomorfológicos, as amplitudes de variações do nível de água da LP está entre 1,5 m para 2,0 m (Marques, 2012), enquanto que as variações do nível de água da LM excede esses valores. Desse modo, o comportamento da LM melhor se aproxima das bacias vizinhas localizadas a oeste dessa região, tal como a bacia do baixo Paraná, com variações de 3 m, e porções da bacia do La Plata, onde as oscilações nos níveis de água podem chegar a 6 m (Maheu et al., 2003).

Padrão espacial

Como foi observado nas séries temporais apresentadas na Fig.5.4 o nível de água é altamente variável na LM, tendo sua dinâmica forçada principalmente pelas descargas dos rios e modulada pela ação dos ventos. Entretanto, Kjerfve e Magill (1989) afirma que o efeito do vento em lagunas estranguladas é mais dinâmico, atuando de uma maior frequência devido os ventos locais. Embora os efeitos dessa forçante possam ser separados em forças locais e distantes, ambos desempenham papéis importantes.

Os efeitos locais incluem: (1) correntes movidas pelo vento, (2) *set-up* e *set-down*, (3) formação de células recirculação e (4) geração de ondas de vento de curto período. Já os ventos distantes atuam na variação no nível das águas costeiras, desse modo não influencia diretamente a circulação da LM, pois a barragem presente no CSG inibe essa ação. Estudos demostram que lagunas costeiras são dinamicamente impulsionadas pelos ventos (Kjerfve, 1994), especialmente quando seu eixo principal é orientado na direção dominante dessa forçante (Smith, 1994). De acordo com Oliveira et al. (2015) os ventos locais são os fatores mais importantes para a dinâmica da LM.

Como é possível observar nas rosas dos ventos expostas na Fig.5.5 (representativa da média dos 5 anos estudados) os ventos que atuam sobre a região da LM são altamente variáveis durante o ano.

Entretanto, a direção predominante é de nordeste, mas se comportam de maneira diferente durante as estações do ano. No outono e inverno há um aumento na incidência de ventos provenientes do quadrante sul, que é associado a passagem de sistemas de frentes atmosféricas tal como frentes frias e ciclones ocasionando a inversão do vento para a direção sul, diferente do que ocorre no verão e primavera.

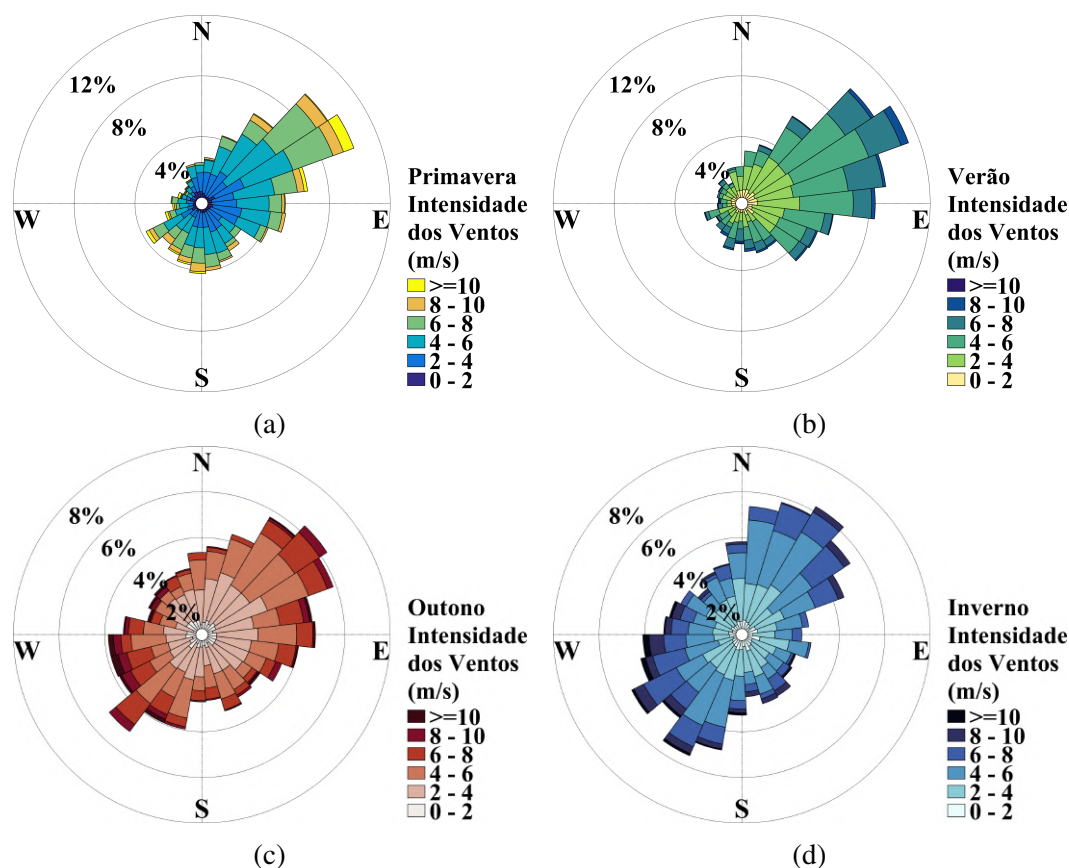


Figura 5.5 – Padrão sazonal de ventos que atua sobre a área de estudo durante o período de 2000 à 20004. Rosa dos ventos durante a primavera (a), verão (b), outono (c) e inverno (d).

Um mecanismo de *set-up/set-down* forçado pela ação local dos ventos é o principal fator que provoca o desnível entre o setor sul e norte da LM. Dessa forma, quanto mais intenso o vento, maior será o gradiente barotrópico de pressão entre os extremos da laguna e maior (ou menor) será a magnitude do escoamento da LM em direção ao CSG. O padrão de circulação é caracterizado por um comportamento do tipo seiche, que quando os ventos são de sudoeste (SE) é observado um aumento na elevação do nível de água no norte em relação ao setor sul da laguna, e o oposto é observado quando os ventos atuam de nordeste (NE). Cujo o comportamento é semelhante ao de outros sistemas próximos, como a Lagoa dos Patos (Möller et al., 2001) e da Lagoa Mangueira Fragoso et al. (2011).

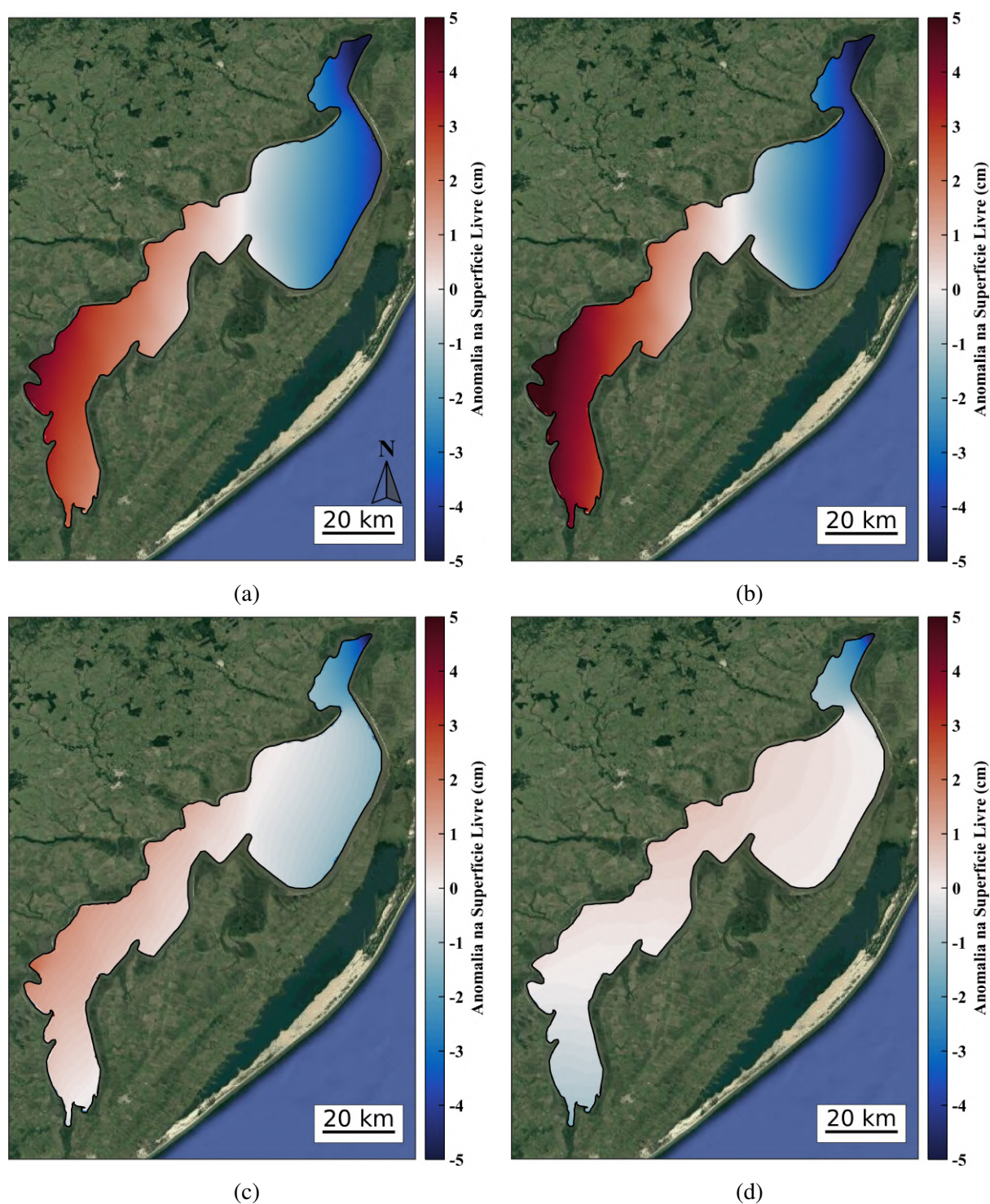


Figura 5.6 – Anomalias sazonais do nível de água da LM considerando o período de 2000 à 2004. As cores em vermelho indicam que o nível de água acima do nível médio sazonal, enquanto que a cor azul mostra os níveis abaixo da média sazonal. A elevação da superfície da água durante a primavera (a), verão (b), outono (c) e inverno (d).

A persistência de ventos de nordeste implica no empilhamento de água na região sul da LM, que acontece durante a maior parte do tempo. Os resultados indicam que durante todo o tempo de simulação o nível de água na região sul se manteve em média 0,08 *m* mais alto do que na extremidade norte. Também é possível constatar que o nível de água na costa oeste é mais alto do que no leste, esse comportamento pode estar associado com presença dos tributários da LM. A permanência desse desnível entre as extremidades dessa laguna também foi relatado por Oliveira et al. (2015) e Costi et al. (2018), que relacionaram esse comportamento a configuração geomorfológica da LM e aos ventos predominantes na região.

Apesar da LM ter um gradiente de pressão bem estabelecido ao longo dos anos de simulação, essa diferença de nível varia sazonalmente em resposta as configurações adotadas pelo vento em cada estação do ano (ver rosa dos ventos na Fig.5.5). A Fig.5.6 mostra o padrão espacial sazonal da diferença entre o nível de água entre as regiões norte e sul da laguna. Durante o verão e a primavera (Figs.5.6a e b) a incidência de ventos de nordeste aumentam a diferença média entre o nível de água entre o norte e a região sul para 0,11 *m*. Por outro lado, o gradiente de pressão é enfraquecido quando a frequência dos ventos vindo do quadrante sul aumentam, isso acontece principalmente durante o outono e inverno (Figs.5.6c e d). Os resultados também sugerem que embora a descarga dos rios dominem a variabilidade do nível de água em longas escalas de tempo, a ação dos ventos modulam a variabilidade espacial do nível da LM. Portanto, estando em conformidade com os padrões encontrados por Munar et al. (2018) e Costi et al. (2018) para essa laguna.

Todavia, em eventos particulares, o desnível induzido pelo vento pode atingir diferenças ainda maiores. A análise de eventuais passagens de frente fria, quando a direção do vento muda abruptamente, destaca a capacidade do vento de induzir *set-ups* e *set-downs* na LM. De acordo com Costi et al. (2018), nessa escala de tempo, o nível de água exibe uma grande amplitude de valores e induz a formação de gradientes barotrópicos de pressão que mudam de direção em períodos mais curtos do que um dia. As diferenças entre os níveis dos extremos da laguna se deslocam de norte para o sul ou da maneira inversa, em função da oscilação dos ventos, como é exibido na Fig.5.7.

A Fig.5.7 ilustra as situações em que os ventos promovem grandes desníveis do nível de água. As Figs.5.7A e B mostram *snapshots* de eventos de ventos de nordeste e de sudoeste, respectivamente, onde os ventos do quadrante sul (S-SE) empurram a água na direção norte, gerando níveis altos de água nessa região. Do mesmo modo, quando o vento sopra do quadrante norte (N-NE) ele empurra a água na direção sul, desse modo aumentando o nível de água na porção sul da LM. Ademais, a ação local dos ventos produzem desníveis de até aproximadamente 2 *m* entre as extremidades da laguna. De

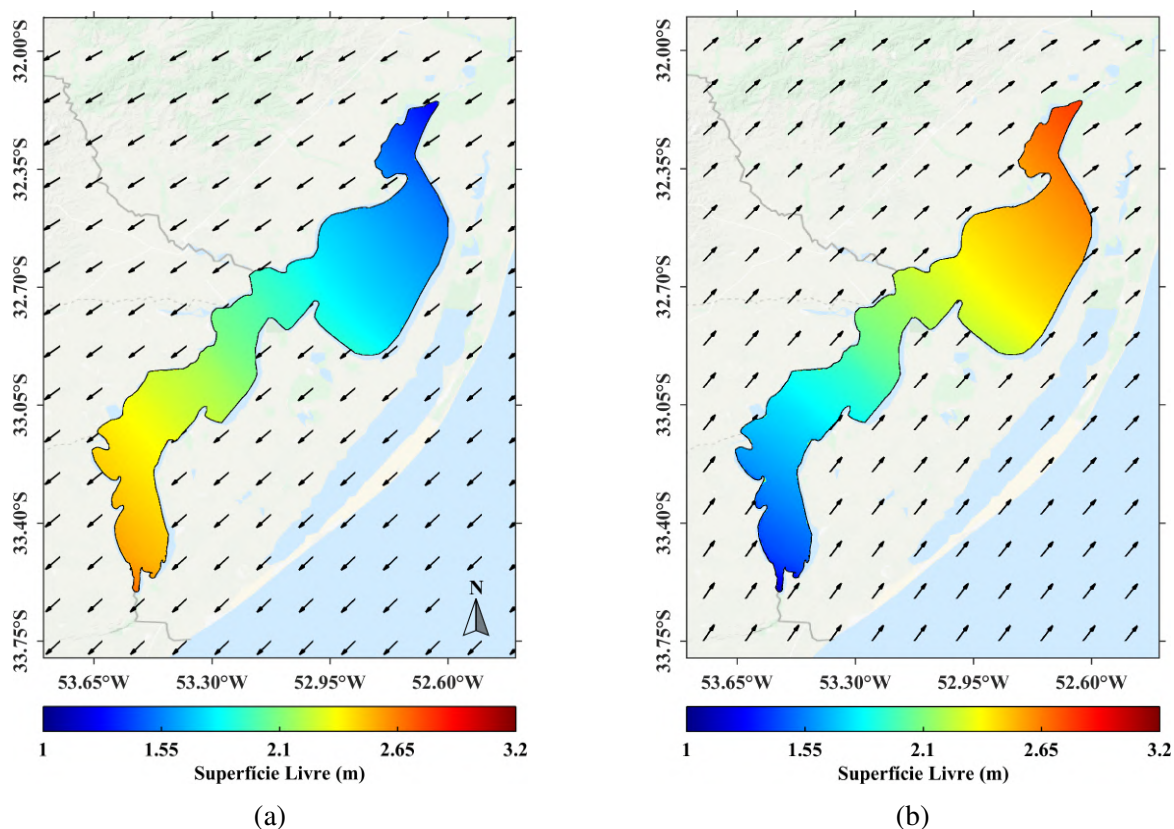


Figura 5.7 – Elevação da superfície livre calculada pelo modelo para o máximo vento (a) nordeste e (b) sudoeste do período simulado. A escala de cor mostra a elevação do nível de água e os vetores mostram a direção da atuação dos ventos.

acordo com (Costi et al., 2018), evento singulares de ventos fortes podem provocar desníveis maiores do que 1 m nesse corpo hídrico. Do mesmo modo, (Oliveira et al., 2019) observou desníveis maiores do que 3 m na mesma região. Portanto, os resultados estão em conformidade aos de outros trabalhos desenvolvidos anteriormente.

5.1.3. Velocidade de corrente

Padrão de circulação residual e sazonal

A análise da hidrodinâmica, mais especificamente do campo de velocidade/direção de correntes da Lagoa Mirim sob a ação das descargas dos rios e dos ventos foi realizada considerando todo o tempo de simulação (2000-2004). A caracterização da hidrodinâmica dessa laguna foi feita através da observação dos campos de velocidade corrente integrados na vertical, e são apresentados na Fig.5.8.

A Fig.5.8A mostra o campo residual de velocidade/direção de correntes para todo o período modelado, enquanto que as médias sazonais para as estações do verão, outono, inverno e primavera são

mostrados pelas Figs.5.8B, C, D e E, respectivamente. Para uma melhor discussão dos resultados, a LM será dividida em três setores, seguindo as configurações adotadas por Oliveira et al. (2019) e Silva et al. (2019): o primeiro se localiza no norte da LM e compreende o domínio entre o início do CSG e rio Jaguarão (JAG); o segundo é ao centro da LM e é delimitado pela área entre os rios Jaguarão (JAG) e Cebollati (CEB); e por último o setor sul, que vai do rio CEB ao extremo sul da LM.

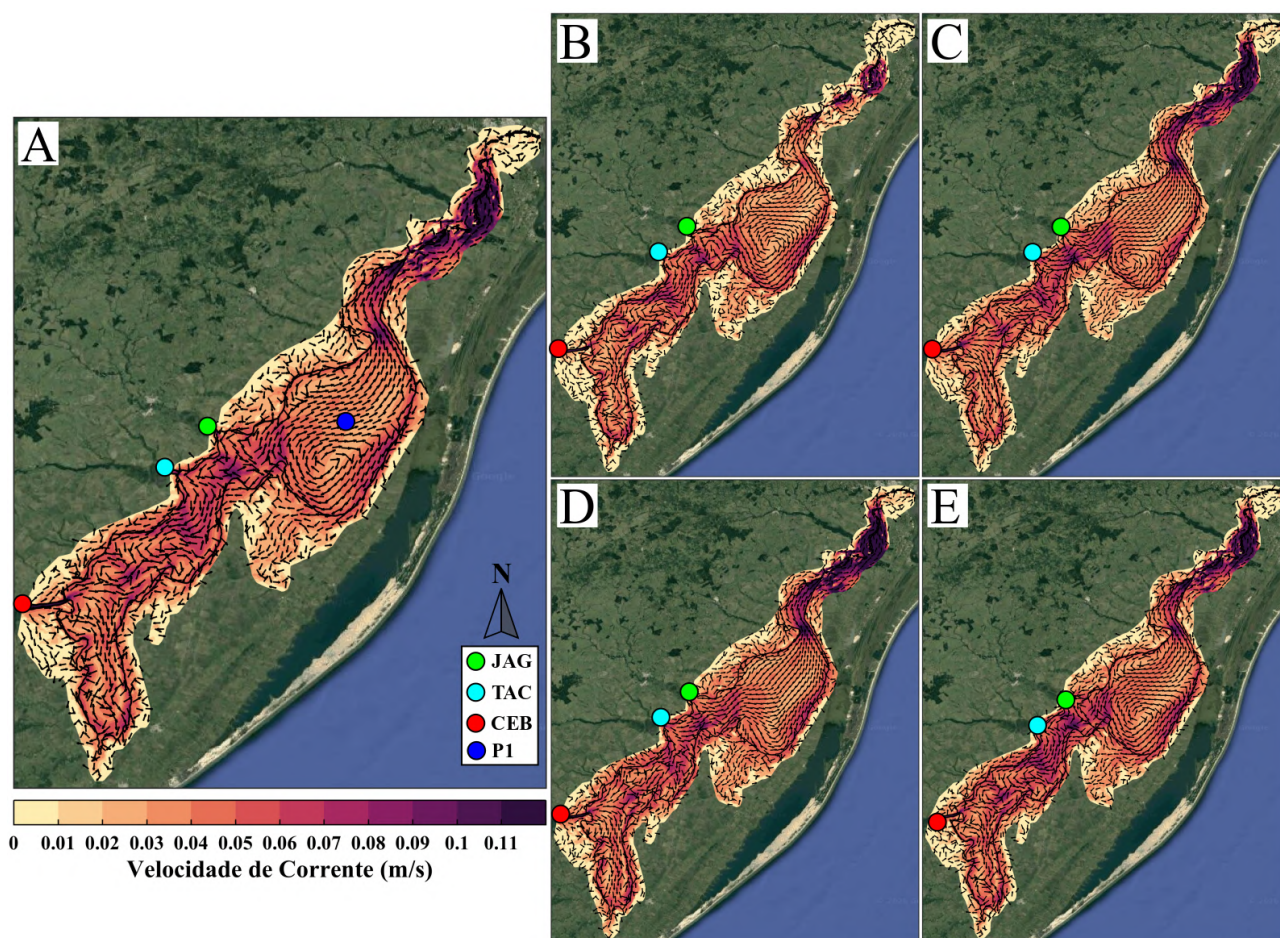


Figura 5.8 – Velocidade de corrente média sazonal entre todo o período de simulação. A velocidade residual (A), verão (B), outono (C), inverno (D) e primavera (E).

As maiores intensidades de velocidade de corrente são observadas no CSG e suas planícies, no extremo norte da LM, na margem leste na mais larga do setor norte e na região central da LM. Os resultados do modelo indicam que a máxima intensidade de corrente integrada ocorre no CSG e sua intensidade varia de $0,15$ à $1,6 \text{ m.s}^{-1}$ fluindo sempre em direção a Lagoa dos Patos, sendo semelhante aos valores ($0,2$ à $1,2 \text{ m.s}^{-1}$) encontrados por Oliveira et al. (2019). As altas velocidades no CSG são relacionadas com o estreitamento da sua largura em seção a LM em direção a LP, e com a força de gradiente de pressão, que é causada pelo desnível de água entre o CSG e a LM. Dentro do domínio

da LM, o maior valor ($0,52 \text{ m.s}^{-1}$) foi verificado no estreitamento da região norte, sendo próximo ao observado ($0,6 \text{ m.s}^{-1}$) pelo Comitê da Lagoa Mirim (CLM, 1970) na mesma região.

O padrão residual e sazonal dos campos de corrente na LM são apresentados na Fig.5.8 e são o resultado da combinação entre um conjunto de forçantes que atuam no sistema. De acordo com Silva et al. (2019) e Oliveira et al. (2019), o padrão de circulação nessa laguna são principalmente dominados pela ação dos ventos e das descargas dos rios. A atuação dessa forçantes na LM provocam a formação de padrões residuais de transporte bem definidos, desse modo, podemos destacar a formação de vórtices próximos as margens e fluxos bidirecionais ao longo do eixo longitudinal da LM.

Na Fig.5.8A é possível observar a linha de corrente que percorre as regiões mais profundas da laguna, que transporta água de sul para norte. Entretanto, há correntes que contornam as regiões rasas dirigidas no sentido contrário da primeira. O padrão residual (Fig.5.8A) sugere que a circulação nas regiões profundas são fortemente influenciada e é causada pela diferença assimétrica de nível entre os setores sul e norte da LM, cujo efeito é o desenvolvimento de forças de gradientes de pressão que apontam de sul para norte. Por outro lado, as áreas rasas são influenciadas pelos ventos de maneira diferente, nessas regiões o fluxo água é dirigido na direção predominante dos ventos. Dessa forma, desenvolvendo correntes no sentido norte-sul conforme podemos observar na margem leste do setor norte e no margem oeste na região central da LM (Fig.5.8A).

De acordo com Kjerfve e Magill (1989) esse comportamento hidrodinâmico é típico de lagunas costeiras. Em seu trabalho, Csanady (1973) mostrou que o estresse dos ventos aplicado na superfície da bacia de profundidades variáveis configuram um padrão de circulação caracterizados relativamente por fortes correntes na direção do vento, cujo retorno é feito através das regiões profundas, assim como ocorre no corpo da LM. Também sendo observado em outros ambientes pelo mundo, como: a LP (Möller et al., 2001; Fernandes et al., 2002); Laguna Cabras na Itália (Ferrarin e Umgiesser, 2005); no Lago Ontário no Canadá (Csanady, 1973) e na laguna Berre na França (Alekseenko et al., 2013).

É válido destacar que há o desenvolvimento de três vórtices expressivos na circulação residual da LM, conforme podem ser vistos na Fig.5.8A. Os dois primeiros se localizam na margem leste e oeste da parte mais larga do setor norte e o terceiro no extremo sul da laguna. Como é observado, eles rotacionam em direções opostas, o primeiro localizado na margem oeste no setor norte gira no sentido anti-horário, enquanto que o da margem leste do setor norte e o do extremo sul giram no sentido horário.

Apesar da LM ter um padrão de circulação bem definido ao longo dos anos de simulação, é possível notar algumas diferenças expressivas em resposta as configurações adotadas pelos ventos e

pela magnitude de descarga imposta pelos rios em cada estação do ano. As Figs.5.8B-D mostram os padrões sazonais das velocidades/direções de corrente integradas na vertical para todo o período de simulação. Assim, como era esperado, as maiores velocidades são observadas no inverno e no outono e as menores no verão, já na primavera a LM se comporta de forma intermediária. Esse comportamento está associado com as variações sazonais nas magnitudes das descargas dos rios (Fig.5.2) e das velocidades/direções dos ventos (ver rosas dos ventos na Fig.5.6).

Um fato interessante ocorre na primavera (Figs.5.8E), onde é possível observar altas velocidades de corrente, que são relacionadas as descargas elevadas e pelo padrão de vento típico dessa estação, que é semelhante ao observado no verão. Desse modo, nessa época do ano a circulação da LM é a que mais se aproxima do padrão residual computado para todo o período analisado (Figs.5.8A). Porém, durante o inverno (Figs.5.8D) há uma intensificação das correntes na região norte da laguna e no CSG, também é retratado que nesse período não há o desenvolvimentos dos vórtices característicos na região norte e sul da LM. Logo, no inverno a circulação da LM passa a ter características semelhantes a de um rio. Esse comportamento pode explicado pelas altas descargas que são características dessa estação, e também pode está relacionado com o enfraquecimento dos ventos no quadrante norte e com o aumento da frequência da passagem de frentes meteorológicas na região, que provoca a intensificação de ventos provenientes do quadrante sul (Moller et al., 1996).

Circulação em períodos de alta e baixa descarga

Essa análise foi pensada com o objetivo de ter um ideia quantitativa do comportamento da circulação da LM sob a influência da combinação entre as altas e baixas descargas e o efeito dos ventos característicos da região. Os eventos foram escolhidos para observar os efeitos entre a combinação de fortes ventos de nordeste (NE) e sudoeste (SE) em períodos de condições de baixa e alta descarga. Dessa forma, compondo quatro eventos (Fig. 5.9): os dois primeiros E1 e E2 (Fig. 5.10), foram selecionados para descrever a resposta hidrodinâmica da LM sob uma conjuntura de descarga com baixa magnitude e fortes ventos de nordeste e sudoeste; e os eventos E3 e E4 (Fig. 5.11), foram selecionados para representar a hidrodinâmica em condições de alta descarga com ventos intensos NE e SE. Aliado a isso, o nível da água, a direção e intensidade da corrente foram analisados para cada evento.

Um mecanismo de *set-up/set-down* pode ser facilmente observado: o nível no topo da laguna diminui a medida em que a água é empilhada no sul, esse comportamento é observado durante os eventos de nordeste (E1 e E3, Figs.5.10a e 5.11a), o inverso acontece quando os ventos são de sudoeste.

Durante esses eventos (E2 e E4) há um empilhamento de água junto ao norte, enquanto que o nível de água diminui no sul da LM, como é mostrado nas Figs.5.10c e 5.11c). Os diferentes campos de velocidade em cada período mostram uma estrutura complexa da circulação da LM, que é composta de diferentes áreas de recirculação que se formam e mudam de direção conforme a atuação dos ventos. Os resultados mostram que durante os períodos de alta descarga (E3 e E4 - (Figs.5.11b-5.11d)) há um aumento nas intensidades das correntes, principalmente nos setores central e norte da LM. Já em períodos de baixas descargas (E1 e E2 - (Figs.5.10b-5.10d)) no geral as velocidades são menores e mudam de direção dependendo da direção do vento.

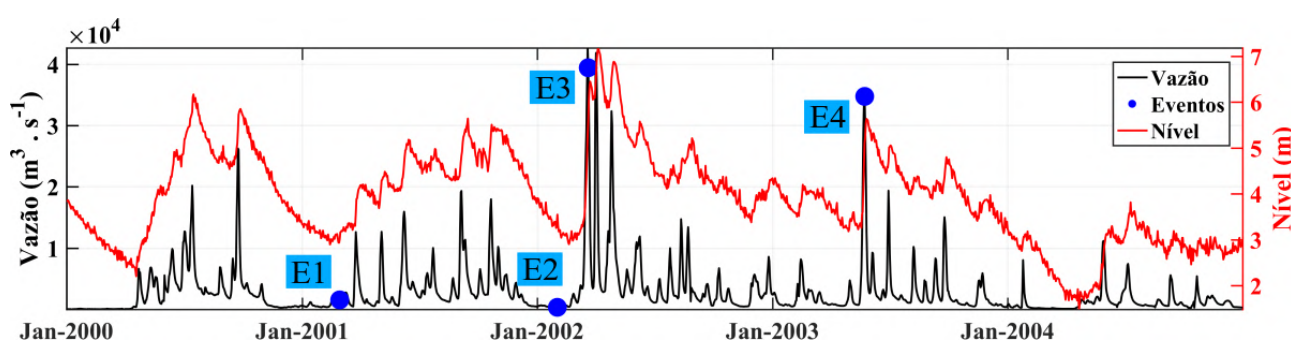


Figura 5.9 – Detalhe da descarga e do nível da LM. Os círculos em azul mostram os eventos selecionados para a análise. A linha preta sólida é a descarga dos rios (Jaguarão + Tacuari + Cebollati) obtidas da Agência Nacional de Águas e em vermelho é o nível de água calculado para o ponto P1, que é indicado na Fig.5.8A.

Durante condições de baixa descarga e nível, mostrada na Fig.5.10, é possível verificar a influência dos ventos na circulação da LM. As Figs.5.10a e 5.10b mostram a configuração da circulação durante o evento E1, sendo retratado que os ventos de NE provocaram um desnível de água entre o setor sul e norte de aproximadamente 0,8 m. Essa assimetria provoca o desenvolvimento de uma força de gradiente de pressão que aponta para o norte, ocasionando na geração de correntes que percorrem as áreas mais profundas da LM, desse modo, transportando água do setor sul até o norte em direção ao CSG. Já a circulação nas áreas rasas se dá seguindo a direção dos ventos, de modo que resulta para sul e influenciam no desenvolvimento de vórtices nas margens oeste e leste do setor norte. O vórtice da margem oeste rotaciona no sentido anti-horário, enquanto que o da margem leste circula na direção oposta.

O oposto ocorre quando a direção do vento se inverte, como é observado no evento E2 (Figs.5.10d e 5.10c). Os ventos de sudoeste provocam um *set-up* no norte e um *set-down* no sul da laguna, ocasionando o desenvolvimento de uma corrente que aponta para o sul, tendo suas maiores velocidades no centro da laguna. Esse comportamento é causado pelo desnível entre o norte e sul da

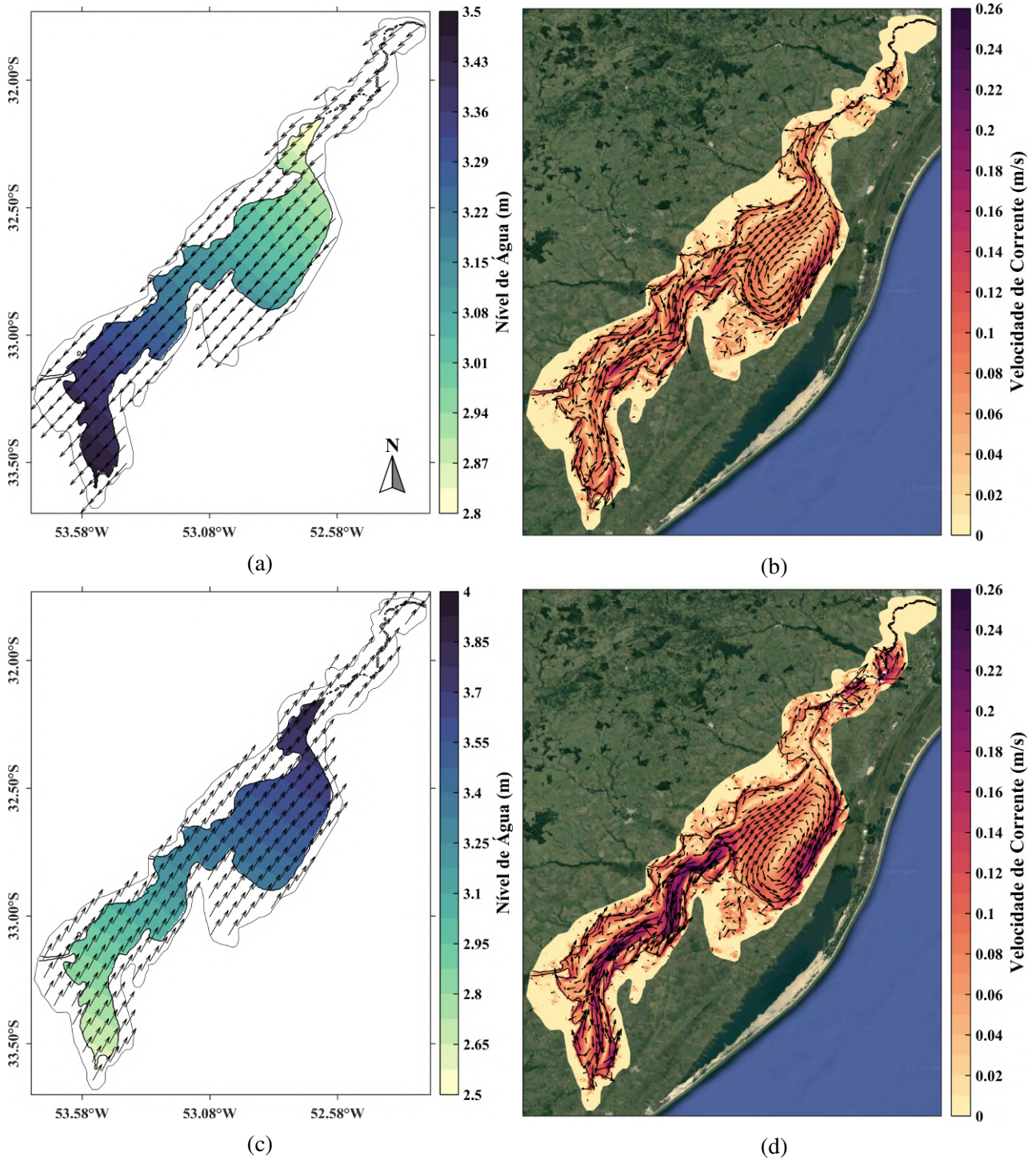


Figura 5.10 – Eventos (E1 e E2 - Fig.5.9) com baixa descarga e ventos de nordeste (Fig.(a) e Fig.(b)) e sudoeste (Fig.(c) e Fig.(d)). Os quadros da esquerda mostram as configuração dos ventos (vetores) e da elevação do nível de água (cores) durante os eventos. Os da direita mostram a velocidade de corrente (cores) e sua direção (vetores).

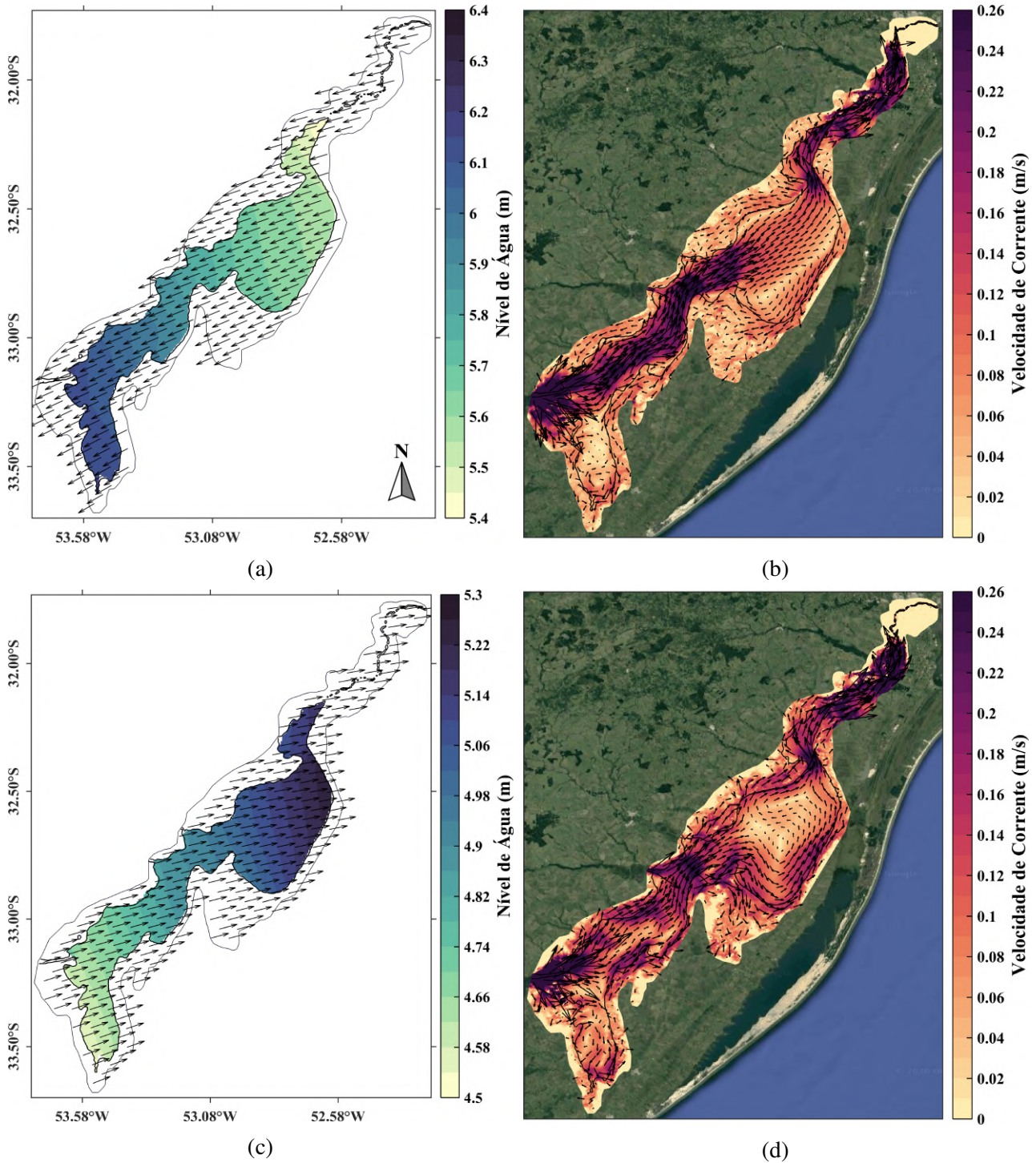


Figura 5.11 – Eventos (E3 e E4 - Fig.5.9) com alta descarga e ventos de nordeste (Fig.(a) e Fig.(b)) e sudoeste (Fig.(c) e Fig.(d)). Os quadros da esquerda mostram as configuração dos ventos (vetores) e da elevação do nível de água (cores) durante os eventos. Os da direita mostram a velocidade de corrente (cores) e sua direção (vetores).

LM, já as maiores velocidades no centro da laguna podem ser explicadas pelo estreitamento da seção do canal. Assim como é observado em E1, dois vórtices se formam nas margens do setor norte, entretanto eles rotacionam em direções opostas ao observado no E1. Esse comportamento é devido à atuação do vento, também em direção oposta à do E1. A circulação induzida pelo vento em regiões profundas e rasas também é observada em corpos lagunares próximos e semelhantes, como na Lagoa dos Patos (Fernandes et al., 2001; Moller et al., 1996).

É interessante destacar a formação de um jato costeiro, na margem leste do setor norte da LM (Figs.5.10b e 5.10d). Essa corrente tem o seu comportamento dirigido principalmente pelos ventos, de forma que, quando os ventos são de nordeste a corrente se direciona para o sul, já ventos de sudoeste resultam em comportamento inverso. Esses jatos formados por vórtices também foram observados por Alekseenko et al. (2013) ao longo da costa leste da laguna Berre na França e por Ferrarin e Umgiesser (2005) para a Laguna Cabras na Itália.

Quando analisamos a circulação da LM durante os períodos que ocorrem os picos de descarga, encontramos um comportamento com características bem distintas dos intervalos em que os rios apresentam pouca vazão. A Fig.5.11 mostram eventos nos quais ocorrem períodos contendo altas descargas combinados com ventos de nordeste e de sudoeste (E3 e E4, respectivamente). As maiores velocidades foram observadas durante esses eventos, os resultados mostram que, no geral, as maiores intensidades de corrente são observadas na região central da LM (entre os rios Jaguarão e Cebollati), na região norte da LM e no CSG. As altas intensidades de corrente observadas durante esses episódios são provavelmente relacionadas às altas vazões impostas pelos tributários, principalmente pelo Cebollati e pela configuração geomorfológica estreita.

Os resultados mostram que as regiões a montante dos rios Cebollati e Tacuari sofrem constrições, reduzindo a circulação e causando uma zona de convergência entre o setor a montante e a jusante do rio Cebollati, isso é causado pela confluência do jato imposto pelas altas descargas desses rios, desse modo, isolando dinamicamente a parte sul do resto da laguna (Ferrarin e Umgiesser, 2005). Ademais, apesar dos eventos E3 e E4 apresentarem altas descargas, ao compará-los entre si, é possível observar que a circulação expõe comportamentos distintos e a principal diferença entre eles está na circulação induzida pelo vento. O mais importante refere-se à presença de vórtices no setor norte que rotacionam de maneira distintas dependendo da configuração adotada por essa força, concordando com os resultados encontrados por Silva et al. (2019), além dos apresentados anteriormente.

Durante E1 os ventos de NE induzem o desenvolvimento de um gradiente de pressão entre o sul e o norte da laguna (Fig.5.10a), que combinado com as altas descargas dos rios provocam velocidades

de corrente uniformes e de magnitudes elevadas no setor central. Esse comportamento pode ser explicado pelo somatório entre a força de gradiente de pressão, força gravitacional que apontam na mesma direção das desembocaduras dos rios. Portanto, todas as forças se direcionam para o norte provocando altas velocidades de corrente no centro e no norte da LM.

É válido destacar que apesar a alta vazão que domina na circulação da LM, os ventos contribuem de maneira efetiva na formação de vórtices na margem leste do setor norte. Quando os ventos são de nordeste (E3 - Figs.5.11a-5.11b) esse vórtice rotaciona no sentido horário. Entretanto, quando os ventos são de sudoeste (E4 - (Fig.5.11c-5.11d) é observado dois vórtices que se giram em sentidos opostos. Esse contraste entre o comportamento desses eventos pode ser explicado pela inversão da força de gradiente de pressão do E4 em relação a E3, cujo efeito gera correntes nas regiões de maior profundidade que retornam pelas áreas mais rasas, as margens (Rao e Murty, 1970; Csanady, 1973). Portanto, é possível afirmar que o efeito das descargas dos rios prevalecem sobre a circulação induzida pelo vento, como é esperado em um sistema com grandes oscilações de descarga fluvial (Webb e Marr, 2016). De acordo com Kjerfve e Magill (1989), a persistência do estresse causado por ventos locais pode aumentar ou reduzir a circulação dependendo da direção e intensidade do vento. Segundo o mesmo autor, o estresse do vento causa fluxo de corrente, mas por causa das flutuações na direção e intensidade, as correntes resultantes são comumente variáveis e intermitentes.

Os resultados hidrodinâmicos da LM fornecem uma nova perspectiva sobre a compreensão da resposta do sistema às principais forças físicas (vento e descarga) nas três regiões. Os resultados indicaram que na região extremo sul ocorreram transporte de água para norte (sul) através das áreas centrais e mais profundas desse setor durante ventos NE (SE), enquanto que o oposto ocorreu nas áreas rasas, cuja direção do escoamento é na mesma direção dos ventos, portanto estabelecendo um fluxo longitudinal bidirecional. Na região central, a direção e intensidade das correntes variam de acordo com a configuração do adotada pelo vento e da magnitude da descarga, se apresentando mais intensa quando a descarga é alta, ou quando há ela é baixa e o vento é de sudoeste. Na região mais larga do setor norte, o fluxo longitudinal foi bidirecional, as correntes nas áreas rasas se direcionam no mesmo sentido do vento, convergindo e retornando pelos canais mais profundos. Quando o vento é de nordeste há a formação células de recirculação nas margens que convergem e retornam pelas regiões profundas, e o oposto acontece durante ventos de sudoeste.

Portanto, podemos afirmar com base nos resultados apresentados nesse capítulo que a combinação entre as altas descargas dos seus tributários ao longo de quase todo o ano (Oliveira et al., 2015) e a localização deles na bacia da LM são os principais fatores que controlam a intensidade do

transporte nessa laguna, enquanto que os ventos modulam as direções e intensidades das correntes. Adicionalmente, quando a descarga dos rios é baixa, o vento é a principal forçante que guia a circulação da LM. Isso se torna mais evidente quando consideramos a alta descarga dos rios junto com eventos de ventos fortes de sudoeste. Segundo Munar et al. (2018), a força do vento produz variações na estrutura do escoamento e nos padrões de circulação da LM, influenciando na diminuição das velocidades de corrente. Entretanto, embora a ação dos ventos promovam inclinações no nível de água entre as extremidades (Oliveira et al., 2015), e criem células de recirculação, isso não muda a orientação do escoamento em direção a LP, mesmo sob condições de vento de quadrante norte (Costi et al., 2018).

5.2. Transporte de sedimentos e morfodinâmica

O transporte de mistura entre sedimentos não coesivos (areia muito fina) e coesivos (silte muito fino) foi modelada numericamente durante um período de 5 anos (2000 - 2004). Os resultados entre o acoplamento do módulo hidrodinâmico TELEMAC-2D e o morfodinâmico SISYPHE estimaram a tensão de cisalhamento com o fundo, redistribuíram as frações sedimentares, calcularam as concentrações de sedimentos em suspensão e uma nova batimetria foi obtida. Assim, foi possível observar diferenças entre as distribuições espaciais das frações sedimentares e zonas de erosão e deposição ao término da simulação, como é observado na Fig.5.12. Essa abordagem foi definida objetivando levar em consideração a influência dos ventos e das descargas sobre as condições hidrodinâmicas que atuam na ressuspensão, no transporte e da deposição de sedimentos na LM.

5.2.1. Tensão de cisalhamento com o fundo

A Figura 5.12a mostra a distribuição espacial média da tensão de cisalhamento obtida para todo o período de simulação. É possível destacar que as áreas que apresentam maior intensidade (em vermelho) estão situadas no CSG e no extremo norte da LM, em toda a margem leste da LM e nos canais dos rios. Conforme era esperado, o estresse com o fundo e consequentemente o maior potencial erosivo tem seu comportamento variável de acordo com as condições hidrodinâmicas (velocidade de corrente) que é dirigida pelo vento e descarga dos rios. Isso ocorre pois, a tensão cisalhante é proporcional ao quadrado da velocidade de corrente (ver Eq.4.9), assim, os maiores valores condizem com as áreas de maior intensidade de corrente na LM (ver na Fig.5.8A).

Os altos valores observados nas planícies de alagamento do CSG provavelmente podem não estar representando de forma realística o estresse com o fundo, isso pode estar relacionado com a grosseira representação da topografia (Costi et al., 2018). Os valores altos observados na margem leste

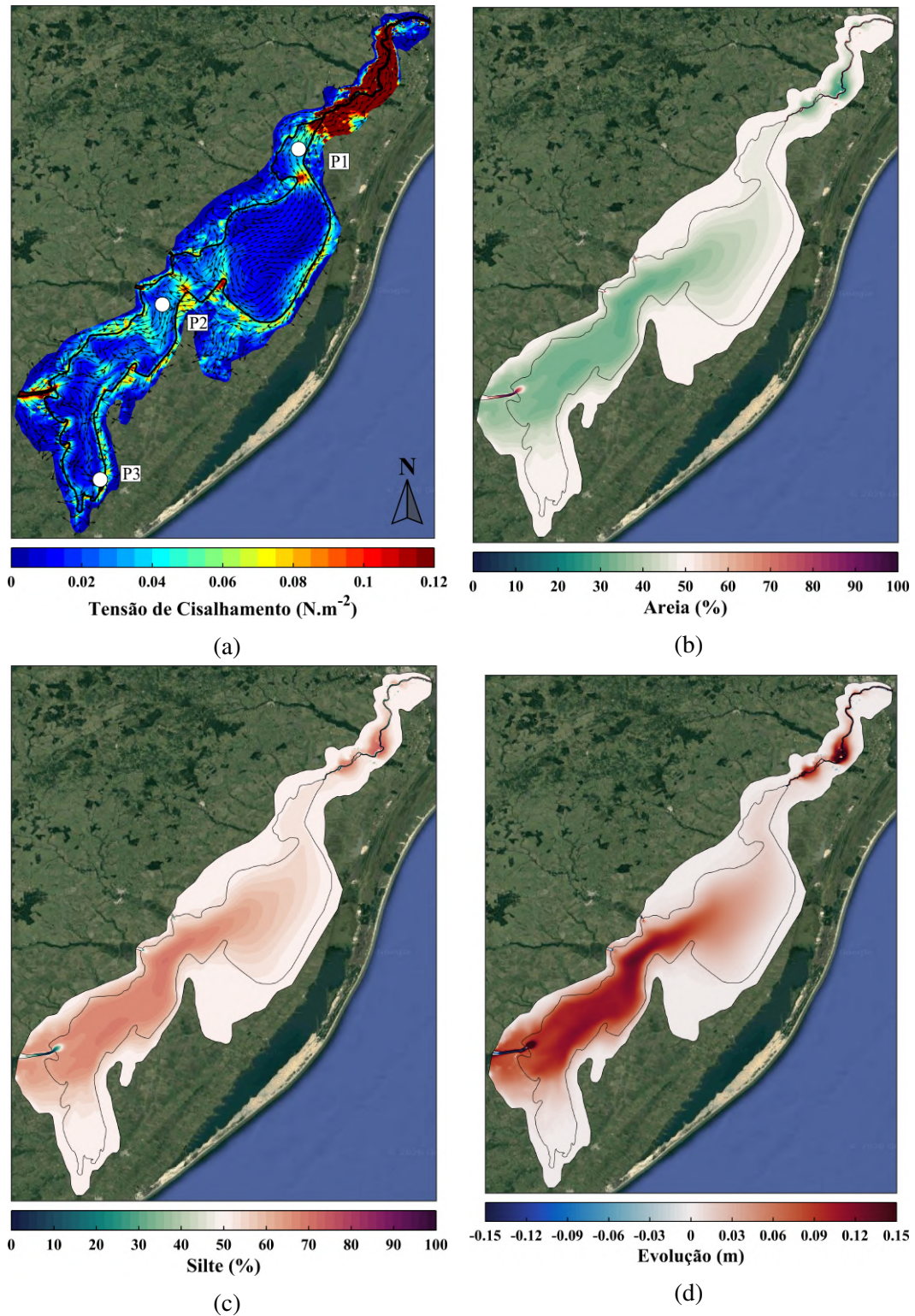


Figura 5.12 – Resultados morfodinâmicos da Lagoa Mirim: (a) Tensão de cisalhamento com o fundo em escala de cores e vetores do padrão residual de correntes; (b) Porcentagem de areia muito fina e de silte muito fino (c); (d) evolução depois de 5 anos de simulação.

no setor norte da LM são relacionados com uma corrente costeira que se desenvolve devido a presença de um vórtice, cujo comportamento é principalmente dirigido pelo vento. De modo que, quando os ventos são de nordeste a corrente aporta para o sul, já para ventos de sudoeste o comportamento é exatamente o oposto. Na margem leste dos demais setores os valores altos se relacionam também com a circulação induzida pelo vento em águas rasas, que também é observado na LM por outros autores (Costi et al., 2018; Munar et al., 2018; Oliveira et al., 2019). As altas descargas dos rios são responsáveis pela intensificação da tensão nos canais de desembocadura dos rios e no extremo norte da laguna, já na região central os valores altos de tensão estão relacionados como a proximidade dos rios e com o estreitamento da seção transversal do canal devido ao crescimento de esporões arenosos que reduzem a área da seção intensificando a magnitude da velocidade do escoamento.

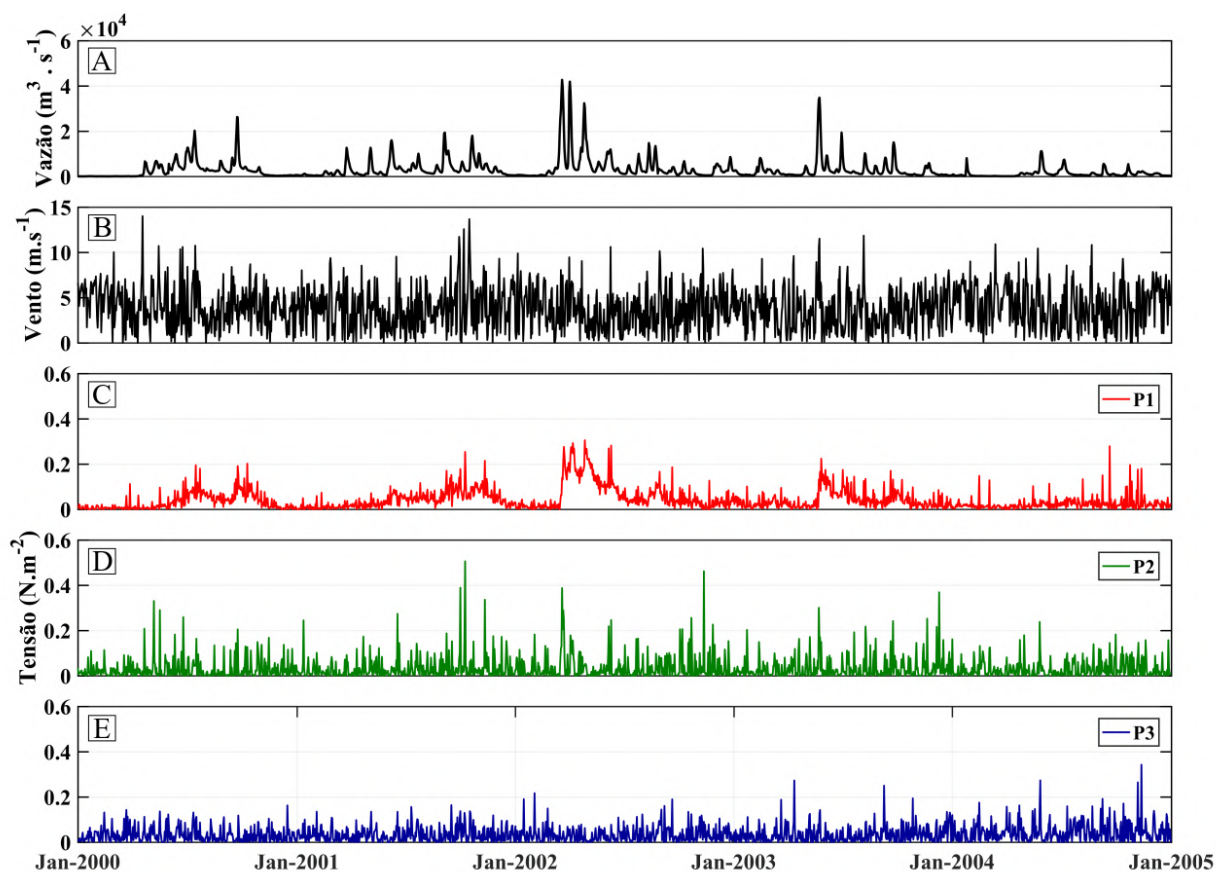


Figura 5.13 – (A) Vazão dos rios, (B) velocidade dos ventos, (C-E) tensão de cisalhamento nos pontos P1, P2 e P3 na Fig.5.12a.

Quando analisamos a variabilidade temporal e espacial, observamos que em quase todo o corpo lagunar o sinal da tensão de cisalhamento tem oscilações de alta frequência, cuja escala temporal é análoga a dos ventos como é mostrado nas Figs.5.13B, D e E. Esses processos possuem oscilações

com ciclo de 20 dias estando de acordo com a escala de variabilidade observada na região (Moller et al., 1996; Marques, 2012; Costi et al., 2018; Oliveira et al., 2019). Entretanto, nos canais dos rios, no CSG e no extremo norte a tensão de cisalhamento apresenta um comportamento que varia de forma sazonal seguindo o mesmo padrão de comportamento imposto pelas descargas, como é observado nas Figs.5.13B e C, portando nessas áreas essa forçante possui maior influência sobre a tensão, e consequentemente sobre potencial erosivo do solos (Bouchette et al., 2010).

5.2.2. Distribuição sedimentar

As Figuras 5.12b e 5.12c mostram a distribuição das frações após os 5 anos de simulação (2000-2005). As tensões de cisalhamento calculadas pelo SISYPHE fornecem uma indicação de onde o fundo é exposto à erosão ou deposição de sedimentos. Os resultados mostram que, onde ocorrem as altas tensões cisalhamento o leito é principalmente composto por frações mais grossas, como é observado nos canais dos rios e no CSG (Fig.5.12b). O inverso ocorre, portanto, onde as tensões são menores, é relatado o acúmulo de sedimentos de menor granulometria (silte), esse padrão é principalmente observado no setor norte e central da LM, como é mostrado na Fig.5.12c. Entretanto, embora a Fig.5.12a indiquem que há vários locais onde a tensão cisalhante é alta, esse valor não foi suficiente alto para superar a tensão de resistência a erosão dos sedimentos do fundo, portanto nesses locais não houve a ressuspensão dos sedimentos finos presentes no leito.

Na área dos canais fluviais, as tensões de cisalhamento são fortes o suficiente ($\tau_b > \tau_{ce}$) para que os sedimentos finos (silte) sejam erodidos e transportados em suspensão até se depositarem no fundo lagunar onde a ressuspensão é limitada. Uma vez que essas partículas adentram na laguna, elas rapidamente decantam, isso ocorre devido a entrada em um ambiente de baixa energia (no caso das areias) ou por floculação (no caso dos sedimentos coesivos) (Mehta et al., 1989). Como consequência desses processos, o fundo fluvial é erodido e os sedimentos são transportados para a jusante, assim se depositando nas desembocaduras fluviais e também sofrendo trapeamento nas áreas de maior profundidade (Arfi et al., 1994).

Quando comparamos as Figuras 5.12b e 5.12c com os transectos mostrados na Figura 5.14, é observado que há uma distinção entre a composição granulométrica tanto entre os setores da LM (norte, central e sul) quanto entre as áreas rasas e profundas. O transecto T1 (Fig.5.14) mostra a composição sedimentar do fundo da laguna ao longo do seu eixo longitudinal de maior comprimento e profundidade.

As máxima profundidades ao longo de T1 alcançam valores maiores do que 6 m na região

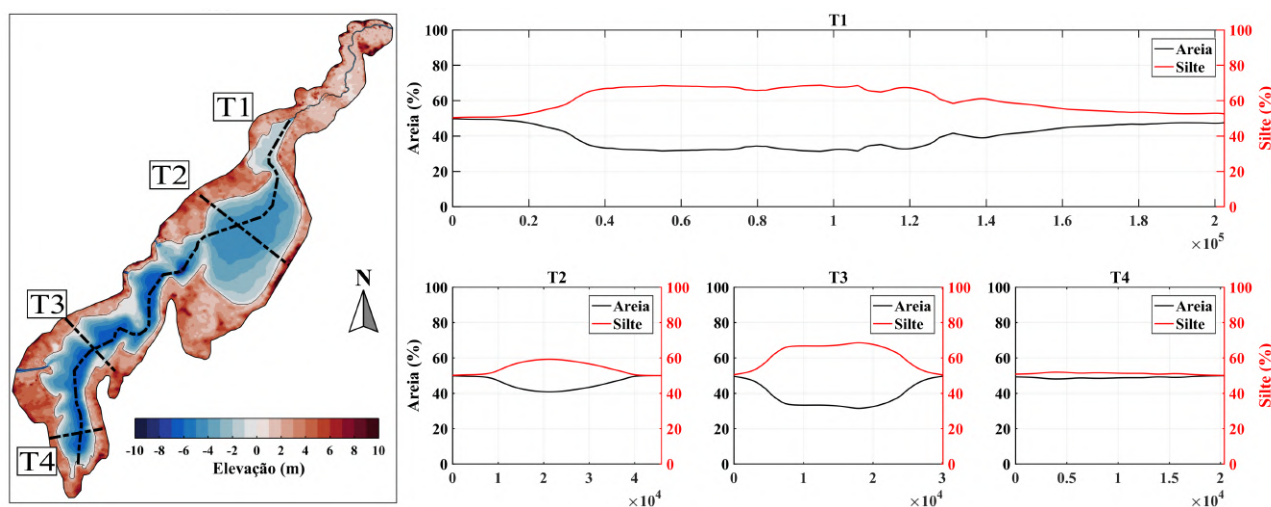


Figura 5.14 – Perfis de frações sedimentares ao longo dos transectos T1 a T4. T1 tem sentido sul-norte e os demais oeste-leste.

central e é composto em média por aproximadamente 39% de areia e 61% de silte. Ademais, é possível destacar um claro zoneamento entre as três principais regiões do corpo lagunar (norte, centro e sul). O setor norte, é a região de maior comprimento e largura, onde sua composição de fundo consiste em até 60% de silte. Entretanto, esse valor se reduz em função da distância dos rios (fonte dos sedimentos finos) e da profundidade, como é mostrado por T2 (Fig.5.14).

A composição transversal de T2 mostra que as regiões de maior profundidade tem a maior porcentagem de sedimentos finos, já nas margens a composição é a mesma da inicial (50% de areia e 50% de silte). A região central, onde a seção transversal é mais estreita e profunda do que o setor norte, tem uma profundidade média de 7 m e composição sedimentar que consiste em aproximadamente 70% de silte e 30% de areia, já nas áreas rasas é observado o mesmo padrão do setor norte (ver T3). Por último, a região do extremo sul, cuja composição sedimentar segue os mesmos padrões da anteriores, portanto, há predominância de silte (aproximadamente 55%) no assoalho lagunar em relação as margens. Entretanto, não há diferenças expressivas entre o as regiões rasas e profundas, isso pode estar relacionado principalmente ao padrão de circulação que não exhibe correntes fortes o suficientes para a mobilização sedimentar.

Podemos destacar que a LM tem um claro padrão de ressuspensão/deposição, é possível observar que há uma predominância de silte no piso lagunar, enquanto que nas regiões marginais, as fácies são dominadas pela igual proporção entre os sedimentos arenoso e siltoso. Apesar do resultado apresentar algumas limitações, ele corrobora com os resultados encontrados por Vieira et al. (2020), em que eles relataram que o setor norte da Lagoa Mirim apresenta as mais altas porcentagens relativas de

sedimentos finos, que responde por quase 100% da composição relativa de sedimentos, a região central apresenta uma composição sedimentar de 30-40% de silte, 20-30% de argila, e as frações restante contêm aproximadamente 30% de areia.

Além disso, os resultados mostraram que na região do extremo sul, o fundo tem composição sedimentar similar com as composições marginais, portanto o modelo não representou bem essa região. De acordo com Vieira et al. (2020), abaixo da isóbata de 4-5 m, há uma mudança na classificação das fácies sedimentares na LM, nesses locais elas são dominadas por silte-argiloso em ambos os extremos norte e sul. Na região central abaixo da isóbata 4-5 m, as fácies sedimentares consistem de areia-siltosa e silte-arenoso. Portanto, o padrão é semelhante ao encontrado por um estudo desenvolvido anteriormente na LM, entretanto os resultados não reproduziram satisfatoriamente as distribuição dos sedimentos na região sul da laguna. Isso pode está relacionado a simplificações adotadas na modelagem morfodinâmica deste estudo, dentre elas podemos destacar que não foi considerado efeito das ondas, do transporte por carga de fundo e, por fim, foi adotado somente duas frações sedimentares.

Os resultados indicam que na LM, o transporte de sedimentos é significativamente induzido em períodos de alta vazão dos rios e é apenas modulado pela ação dos ventos, que promovem o transporte em pequenas escalas de comprimento e tempo, tendo seu papel principal na formação de células de recirculação que aumentam o tempo de residência das águas (Silva et al., 2019), cujo efeito é de aprisionamento dos sedimentos nessas regiões. Portanto, a descarga é o principal agente responsável pelo transporte de sedimentos na LM. Isso pode ser principalmente observado durante os períodos de alta vazão, pois os sedimentos são colocados em suspensão e advectados para todo o corpo lagunar. Desse modo, foi possível observar que os picos de descarga provocaram os seguintes efeitos: (1) aumento da concentração de sólidos dissolvidos na água e assim induzindo uma alta turbidez, (2) uma rápida remoção de frações finas das interfaces sedimentares do leito dos rios e (3) deposição das frações finas nas regiões mais profundas da laguna, formando bacias deposicionais.

Esse comportamento é típico de ambientes de condições energéticas de transição, onde os rios apresentam uma maior energia no escoamento e o corpo lagunar apresenta uma menor energia. Na LM as frações maiores se localizam onde a hidrodinâmica é mais intensa e as menores nas regiões profundas, onde não há capacidade ressuspensão. Vieira (1995) e Vieira et al. (2020) identificaram que a zona marginal da LM, acima da linha batimétrica de 6 m abrange os sedimentos arenosos, indicando que sob tal combinação entre condições batimétricas e hidrodinâmicas, a ressuspensão de sedimentos finos é dominante. Pequenas velocidades superficiais de corrente observadas na zona central da laguna combinada com profundidades menores que 6 m promovem condições para a deposição da

fração argilosa, sendo a ultima situada nos canais mais profundos dessa laguna. Portanto, os padrões apresentados em nossos resultados inéditos se mostraram que estão em conformidade com os trabalhos desenvolvidos anteriormente.

5.2.3. Evolução morfológica

A evolução morfológica da laguna após um período de simulação de 5 anos é mostrada na Fig.5.12d. Os resultados confirmam que a o efeito da descarga dos rios é o agente causador dos processos que transportam os sedimentos na LM. As principais áreas de erosão estão concentradas nas regiões das desembocaduras dos rios, no CSG e em suas proximidades, isso ocorre devido a alta vazão e por suas configurações estreitas que provocam uma intensificação das velocidades de corrente, que por consequência aumentam a tensão cisalhante e a capacidade de erosão (Julien, 2010). Ademais, esse processo é evidente nos períodos em que ocorrem os picos de descarga, assim os sedimentos são colocados em suspensão e transportados pelas correntes, logo sendo depositado nos canais mais profundos da LM.

Podemos destacar que a erosão atuou principalmente na fração silte, isso ocorre pois as suas partículas são mais leves e tem uma menor resistência a erosão, diferente da fração areia. Portanto, durante a simulação a evolução morfológica do fundo lagunar foi causada principalmente pela deposição de partículas coesivas (silte), cuja origem foi a erosão dos leitos fluviais forçada pela forte vazão dos rios. Além disso, é observado na Fig.5.12d três zonas distintas de deposição na LM. A primeira zona abrange o norte da laguna onde se situa a região de maior largura, no extremo norte dessa áreas está localizado o Canal do Sangradouro (SAN) (P1 da Fig5.15).

Nesse local foi estimado um gradiente na evolução do fundo lagunar, que apresenta valores máximos e mínimos de aproximadamente 8,5 cm e de 1,2 cm que cresce na direção sul-norte. O setor central, a região apresentou maior capacidade de deposição, ao final da simulação teve valores máximos de 50 cm no delta do rio Cebollati e 13,5 cm em frente ao rio Tacuarí, que também é a área mais profunda da laguna (P2 da Fig5.15). Por último, o setor sul apresenta os menores valores, cuja amplitude vai de aproximadamente 10 cm no topo e 0,15 cm no extremo sul, onde se localiza o Porto de Santa Vitória do Palmar (SVP) (P3 da Fig5.15).

O padrão médio da deposição de sedimentos ao longo da LM resulta do equilíbrio entre a erosão e os processos deposicionais, juntamente com a variabilidade temporal da descarga, distância dos rios (fontes de sedimentos) e configurações batimétricas. Na LM, a vazão dos rios apresentam uma escala de variabilidade que varia de intra-sazonal a anual (Costi et al., 2018; Oliveira et al., 2019), também

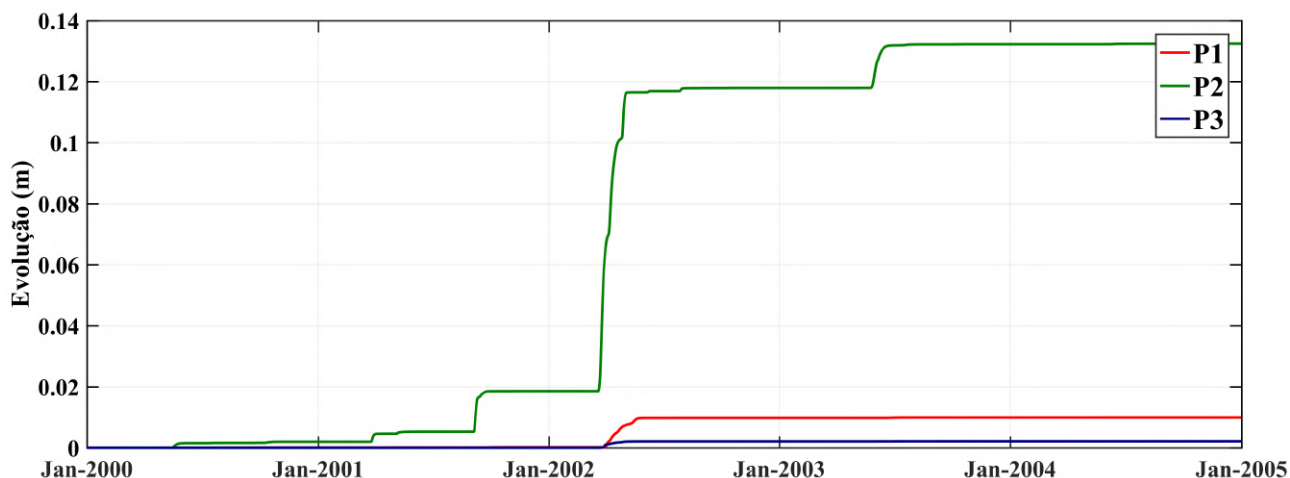


Figura 5.15 – Evolução do fundo nos pontos P1, P2 e P3 na Fig.5.12a.

há um claro zonamento hidrodinâmico onde as maiores velocidades de corrente são observadas no extremo sul e nas desembocaduras dos rios, e as menores no setor sul.

De acordo com Silva et al. (2019), o tempo médio de permanência das águas da LM é de 180 dias, embora os setores sul (350 dias) e norte (100 dias) exibem tempos de residência notavelmente diferentes. O mesmo autor relata que embora os picos de descarga aumentem o transporte na LM, eles afetam ao mesmo tempo negativamente a retenção de água entre os setores sul e central, pois durante esse período os jatos de descarga bloqueiam hidraulicamente a circulação entre esses setores. Adicionalmente, Vieira et al. (2020) afirma que o tempo de residência é importante na regulação do processo de fonte e sumidouro e é relacionado a formação do leito sedimentar recente da LM. Portanto, isso explica a clara distinção do padrão de deposição entre os setores norte, central e sul da LM. Visto isso, durante os picos de descarga há um aumento no transporte de sedimentos do leito dos rios em direção a laguna, entretanto esses sedimentos são barrado pelos jatos provocados pelos rios, portanto, isso explica os diferentes padrões de transporte e deposição entre dos setores da LM.

De maneira semelhante ao observado na LM, Arfi et al. (1994) identificou na Laguna Ebrié (Costa do Marfim) que a sedimentação é significativamente modificada pelo vento, induzindo principalmente a ressuspensão. Somado a esse efeito, a batimetria e a distância dos rios (principal fonte dos sedimentos finos) contribuem para o zoneamento do leito do Ebrié. Portanto, as características das fácies são dependentes dessas 3 componentes que controlam a dinâmica sedimentar. De acordo com Vieira et al. (2020), a composição do leito da Lagoa Mirim é uma consequência do regime de circulação da água, resultante da exposição predominante dos ventos, cujo efeito é desenvolver uma zona de ressuspensão no litoral que é composto principalmente por areia, e também uma zona de deposição central que é

dominada por silte e argila.

Em relação as taxa de sedimentação, elas foram calculadas a partir da relação entre a evolução morfodinâmica (ver na Fig.5.12d) e o tempo de simulação. Então, podemos afirmar que a taxa de deposição na parte norte da laguna tem uma amplitude de valores que vão de 17 a 2,4 mm.ano⁻¹. Na parte central, o valor máximo computado foi de 27 mm.ano⁻¹ e no setor sul 0,3 mm.ano⁻¹. Entretanto, quando comparamos com a deposição de outros ambientes semelhantes observamos que os resultados obtidos para o setor central da LM é relativamente alto, isso pode está relacionado com a condição hidrodinâmica, cujo comportamento provoca um aprisionamento dos sedimentos entre os rios Jaguarão e Tacuarí.

Por exemplo, Toldo Jr et al. (2006) identificou que a taxa de sedimentação de longo prazo da Lagoa dos Patos varia entre 0,52 e 0,75 mm.ano⁻¹ e as de curto período, por sua vez, indicam valores de 3,5 e 8,3 mm/ano. Logo, quando comparadas com as variações relativas do nível do mar regional, com valores entre 0,7 e 1,3 mm.ano⁻¹, indicam que a LP apresenta uma tendência de inversão entre o deficit acrescional de longo período, para um superavit acrescional de curto período (Toldo Jr, 1991). Ou seja, o atual processo de assoreamento do piso lagunar é mais rápido que a subida relativa do nível do mar regional.

Com base nos resultados deste estudo, a evolução do leito da LM pode ser separada entre as regiões profundas e rasas, como também em três áreas (norte, central e sul). A região central apresenta evolução mais rápida, que não é observado nos outros dois setores. Isso ocorre pois nela se localizam as fontes de sedimentos (rios) e também é dominada por efeitos hidrodinâmicos favorecendo a deposição nessa área. O setor norte está localizada a montante da região central, portanto é constantemente nutrida por sedimentos advectados pelos rios que não foram depositados na área central da laguna, logo ela apresenta uma evolução mais lenta e em menor escala de magnitude.

Geralmente, os resultados obtidos na modelagem numérica de curto prazo são úteis como um indicador de regiões com maior ou menor deposição de sedimentos. No entanto, esses resultados consideram apenas duas classes de sedimentos em suspensão (areia muito fina e silte) e o processo de consolidação não é considerado na modelagem numérica de curto prazo. O processo de consolidação é um processo importante associado à ocorrência de sedimentos coesivos previamente depositados, considerando as variações na densidade ou viscosidade dos bancos de lama (Marques et al., 2010). Pois, sedimentos consolidados não são facilmente remobilizados pela tensão de cisalhamento do leito, trazendo sedimentos finos para a coluna d'água. Adicionalmente, os efeitos da consolidação podem ser considerados uma importante contribuição para a intensificação das taxas de deposição ao longo da

LM. Além disso, a ausência de fontes de sedimentos nas desembocaduras dos rios, também é outro fator limitante do estudo.

5.3. Operações de dragagem

As simulações dos 7 cenários de dragagem definidos na Tab.4.6 foram realizadas utilizando o módulo de operações de dragagem NESTOR acoplado com o TELEMAC-2D e o SISYPHE. Para cada cenário foi realizada uma simulação de 30 dias com o objetivo de executar as atividades de dragagem e de despejo, como também comparar a eficiência dessas estratégias e os efeitos hidro-morfodinâmicos causados pelas mudanças batimétricas entre o esquema de dragagem proposto pelo DNIT (2014) (cenário de referência) e de outros 6 propostos nesse estudo.

As Figs.5.16 e 5.17 mostram as mudanças batimétricas provocadas pela execução das atividades de dragagem e de bota-fora com o NESTOR para cada um dos cenários propostos. Além disso, elas foram executadas nos Canais do Sangradouro (CS) e de Santa Vitória do Palmar (CSVP), respectivamente. Os principais resultados do NESTOR são as mudanças batimétricas e os volumes removidos do leito, e um resumo dos resultados encontrados após o término das simulações são expostos na Tab.5.1.

Tabela 5.1 – Resumo das simulações de dragagem e despejo com o NESTOR.

Cenário	Profundidade de Dragagem (m)		Volume Dragado (m ³)		Distância P/ Despejo (m)		Volume Despejado (m ³)	
	CS	CSVP	CS	CSVP	CS	CSVP	CS	CSVP
Dr30	-3,0	-3,0	660.304	445.985	-	-	-	-
Dr35	-3,5	-3,5	828.808	619.545	-	-	-	-
Dr40	-4,0	-4,0	1.139.932	793.018	-	-	-	-
Dr30D300	-3,0	-3,0	660.304	445.985	300	300	660.304	445.985
Dr30D500	-3,0	-3,0	660.304	445.985	500	500	660.304	445.985
Dr30D700	-3,0	-3,0	660.304	445.985	700	700	660.304	445.985
Dr30D1000	-3,0	-3,0	660.304	445.985	1.000	1.000	660.304	445.985

Podemos observar na Tab.5.1 que na medida em que a profundidade da atividade de escavação aumenta os volumes computados também crescem, como é observado nas diferenças entre as batimetrias e os volumes dos cenários Dr30, Dr35 e Dr40. Outro fato interessante ocorre quando o NESTOR é configurado tanto para realizar para atividades de dragagem quanto a de bota-fora. Dessa forma, todo o volume que é removido pela escavação é despejado no local indicado pelo usuário, gerando consequentemente evolução no leito da LM, como é observado nas Figs.5.16 e 5.17.

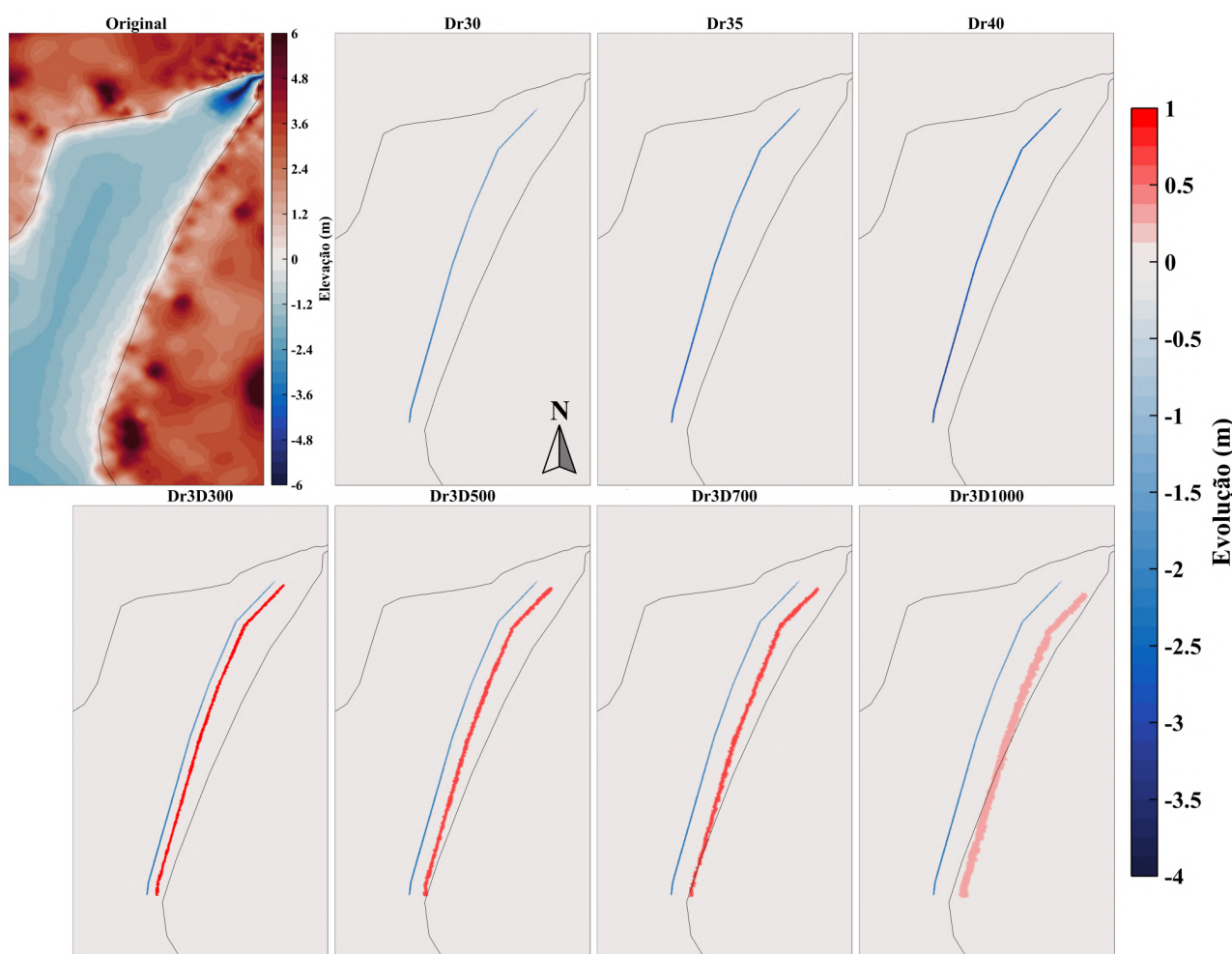


Figura 5.16 – Resultados das mudanças batimétricas computadas pelo NESTOR para o Canal do Sangradouro (CS) para todos os cenários analisados.

No entanto, isso é uma simplificação adotada pelo modelo, pois, quando o material é removido pelos equipamentos de dragagem, sejam eles hidráulicos ou mecânicos, há uma perda por ressuspensão (Thorn, 1975; Blazquez et al., 2001; Bray, 2004). De forma semelhante, também há perdas de material na hora do despejo, pois ao ser removido o material do leito perde seu estado de compactação e fica mais exposto aos efeitos hidrodinâmicos locais. Logo, ao serem despejados parte dos sedimentos podem se manter em suspensão e ser transportado para outras regiões. Portanto, esse material pode ser dispersado na coluna d'água, podendo até ser transportado por longas distâncias podendo causar graves problemas ambientais (Antipov et al., 2006; Du e Li, 2010; Manap e Voulvoulis, 2015; Staniszewska et al., 2017). Diante disso, é possível notar que esses efeitos não são considerados nessa modelagem, então isso explica o motivo do volume removido ser subsequentemente depositado em igual quantidade.

Nas seções seguintes serão analisadas a eficiência dessas operações de dragagem, sob o

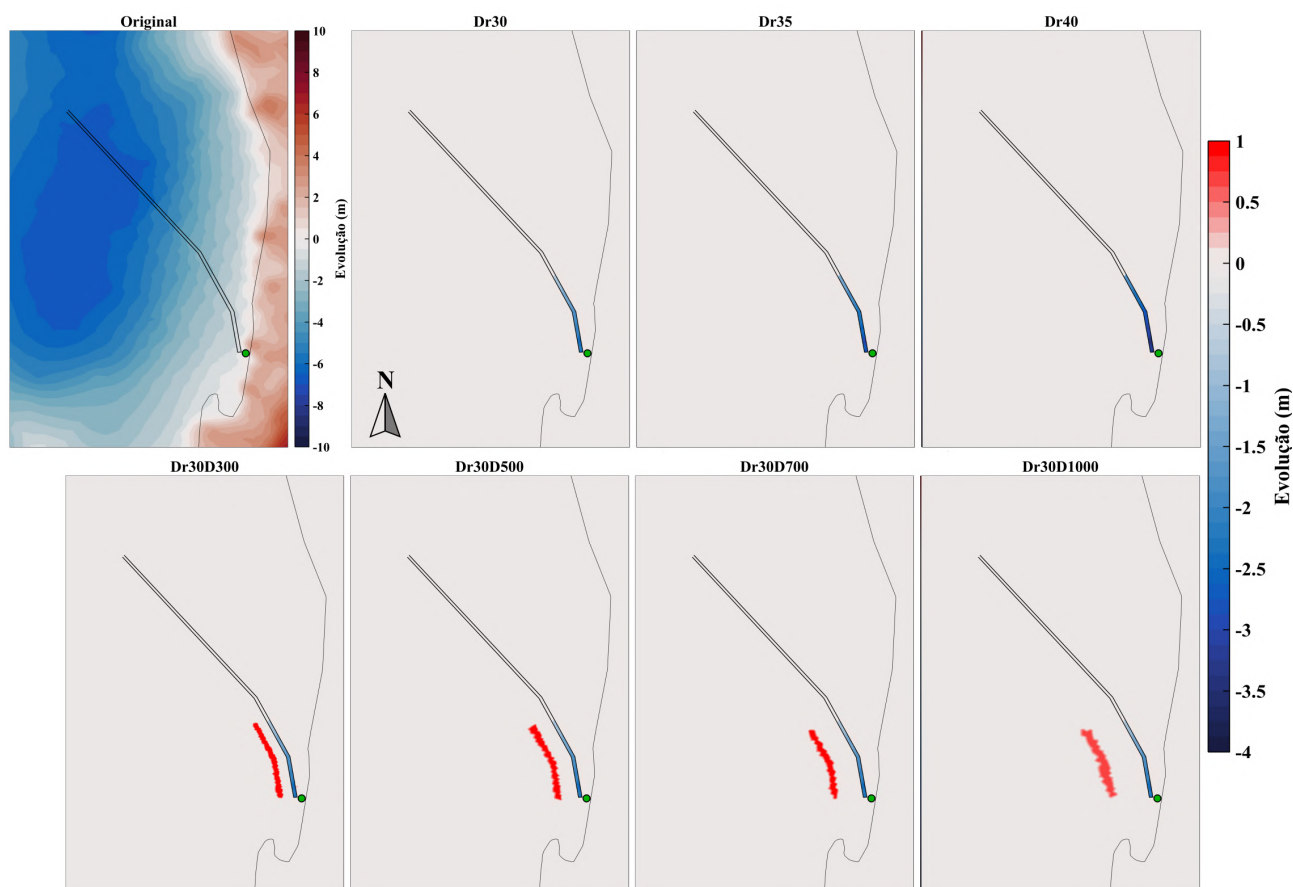


Figura 5.17 – Resultados das mudanças batimétricas computadas pelo NESTOR para o Canal de Santa Vitória do Palmar (CSVP) para todo os cenários investigados.

ponto de vista da sedimentação dos canais, e também será analisado os impactos sobre as variáveis hidro-morfodinâmicas causadas pelas operações de dragagem e despejo nessa laguna.

5.3.1. Eficiência das estratégias

Após obter os novas batimetrias e computar os volumes de dragagem com o NESTOR, foram realizadas outras 7 simulações utilizando o acoplamento entre o TELEMAC-2D e o SISYPHE considerando as novas batimetrias, cada uma teve a duração de 5 anos (2000-2004). Elas foram realizadas com o objetivo de avaliar as diferenças hidro-morfodinâmicas e também de analisar a eficiência das diferentes estratégias de dragagem e bota-fora para os canais de navegação da hidrovia da LM. Para isso, foi adotado como a simulação de referência o cenário proposto pelo (DNIT, 2014), o Dr30D300, que representa a profundidade de 3m de canal com bota-fora a uma distância de 300m. Além disso, os outros esquemas propostos foram subtraídos do cenário de referência (Dr30D300) para que possamos observar as diferenças entre as variáveis hidro-morfodinâmicas. Por fim, os dois canais

foram avaliados de maneira separada e serão apresentados a seguir.

Canal do Sangradouro - CS

A Fig.5.18 mostra as diferenças entre a evolução do fundo do cenário de referência (Dr30D300) e das demais configurações propostas após 5 anos de simulação. A escala de cor mostrada nessa figura tem o seguinte significado: se o valor é positivo (em vermelho) é interpretado que a estratégia sugerida ocasionou um maior assoreamento do que a de referência (Dr30D300). O inverso ocorre quando o valor é negativo (em azul), significando que o cenário sugerido resultou um menor assoreamento do que o de referência.

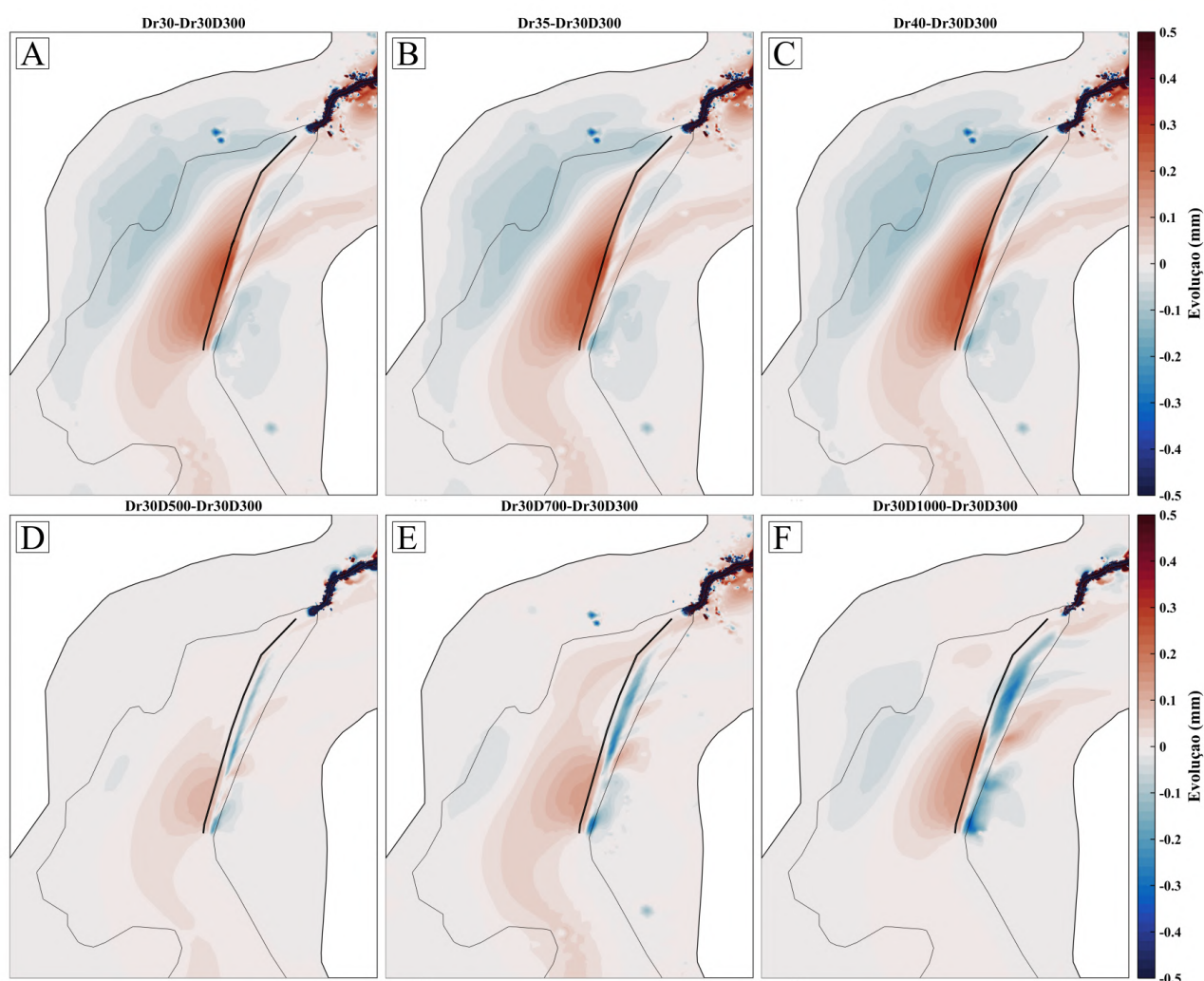


Figura 5.18 – Diferenças na evolução morfológica após 5 anos de simulação entre o cenário de referência (Dr30D300) com os demais para CS.

Os resultados mostram que o padrão de erosão/deposição são similares para todos os cenários:

a erosão é concentrada no CSG e a deposição por todo o fundo lagunar, ocorrendo especialmente nas regiões mais profundas dos canais. Embora esses padrões sejam semelhantes, é possível notar diferenças entre as magnitudes de sedimentação, como pode ser observado na Fig.5.18. Ao analisarmos a diferença na evolução do fundo entre os cenários com (Fig.5.16Dr30D300) e sem (Fig.5.16Dr30) atividades de despejo, encontramos que nesse caso não há a relação direta entre a atividade de bota-fora e o aumento da deposição de sedimentos no CS. Portanto, não podemos vincular o aumento do assoreamento do canal com a atividade de despejo em suas proximidades, os resultados apresentados nas Figs.5.18A-C e na Tab.5.2 mostram esse fato.

Tabela 5.2 – Diferenças entre as variáveis hidro-morfodinâmicas de todos os cenários no CS.

Cenários	CS					
	Velocidade		Tensão		Evolução	
	Média (m.s ⁻¹)	Desvio (%)	Média (N.m ⁻²)	Desvio (%)	Final (mm)	Desvio (%)
Dr30	0,0801	-0,6661	0,0493	-1,1678	22,2114	+0,5748
Dr35	0,0818	+1,4496	0,0501	+0,3587	22,2168	+0,5991
Dr40	0,0832	+3,1942	0,0507	+1,4636	22,2171	+0,6006
Dr30D300	0,0806	Referência	0,0499	Referência	22,0845	Referência
Dr30D500	0,08053	-0,1286	0,04982	+0,2080	22,1156	+0,1981
Dr30D700	0,08056	-0,2180	0,0497	-0,2934	22,1282	+0,19817
Dr30D1000	0,0808	+0,1401	0,0501	+0,3997	22,1390	+0,24692

Portanto, isso contraria o que era esperado quando essa estratégia foi desenhada, pois era esperado que os sedimentos da área de despejo regressassem para dentro da hidrovia. Esse comportamento pode ser explicado devido ao fato de que as correntes nessa região apontam majoritariamente na direção nordeste, logo, isso implica que a zona de despejo está a jusante do canal de navegação. Logo, os sedimentos da área de bota-fora são transportados em direção ao CSG e não retornam ao canal de navegação. Consequentemente, as variações na sedimentação foram resultado das mudanças batimétricas, que por consequência modificaram a hidrodinâmica e o transporte sedimentar da laguna.

A Tab.5.2 mostra a evolução ao termino das simulações, e ao comparar os resultados das simulações executadas com diferentes profundidades de canal (Dr30, Dr35 e Dr40), foi observado que quanto maior é a profundidade de dragagem, maior será o assoreamento desse canal. Adicionalmente, o aprofundamento causa o aumento da seção transversal do canal e favorece o vazamento da laguna, assim foi observado o aumento na velocidade de corrente e consequentemente na tensão de cisalhamento (Dr30, Dr35 e Dr40 na Tab.5.2). Apesar do aumento das velocidades indicar uma condição favorável para redução de futuras dragagens de manutenção, isso não foi observado, pois o aumento da velocidade

de corrente não foi grande o suficiente para que os sedimentos não se depositassem dentro dos canais, pelo contrário, a maior profundidade serviu como uma armadilha para a deposição das frações finas dos sedimentos. Um comportamento semelhante foi encontrado por Martelo (2019) ao estudar as variações hidro-morfodinâmicas causadas pela execução de dragagem no canal de acesso do Porto de Rio Grande, localizado no estuário da Lagoa dos Patos, seus resultados mostraram que essas intervenções aumentaram o assoreamento desse canal de navegação.

No geral, os resultados das diferentes estratégias não mostraram grandes diferenças nas taxas de sedimentação. Desse modo, podemos destacar que o pior cenário, é o Dr40 pois provocou maior sedimentação. O melhor cenário (menor sedimentação), é o Dr30D300 e isso indica que quanto maior é a profundidade, maior é a taxa de sedimentação no CS. Desse modo, esses resultados destacam que a distância entre o canal de navegação e as áreas de despejo dificilmente reduzem o assoreamento do canal, pois não houve uma redução da evolução ao se despejar os sedimentos em uma maior distância do canal de navegação. Com base nos resultados, foi observado que a estratégia que causou uma menor sedimentação foi a Dr30D300.

Canal de Santa Santa Vitória do Palmar - CSVP

De forma semelhante ao que ocorre no CS, os resultados encontrados para os 7 cenários não apresentam diferentes padrões de deposição/erosão na região do CSVP, embora eles tenham alterado a magnitude dos processos hidro-morfodinâmicos. Logo, é possível notar que as estratégias aumentaram ou diminuíram a sedimentação nos canais e fora deles. A Fig.5.19 e a Tab.5.3 mostram os resultados das diferenças entre os cenários sugeridos e o do DNIT (2014) após 5 anos de simulação hidro-morfodinâmica.

Os quadros da região superior da Fig.5.19 mostram as diferenças entre o cenário base e os que não há despejo de material dentro da laguna. Desse modo, é possível notar que os dois primeiros provocaram efeitos semelhantes em relação ao cenário base (Dr30D300), assim podemos observar o surgimento de uma zona que apresenta menor assoreamento ao centro do CSVP. Além disso, também é relatado que essas estratégias causaram maior deposição de sedimentos na região mais rasa, que se localiza no extremo sul do canal. Entretanto, quando analisamos a deposição média de todo o canal para esses dois casos é constatado que eles tem uma taxa de sedimentação 0,2266% (Dr30) e 0,3038% (Dr30) maior do que o cenário base, portanto apresentaram melhor desempenho.

No entanto, o cenário Dr40 (dragagem de 4,0 m e sem bota-fora) teve um padrão diferente dos dois cenários anteriores que também não utilizaram o despejo do material dentro da laguna. Os

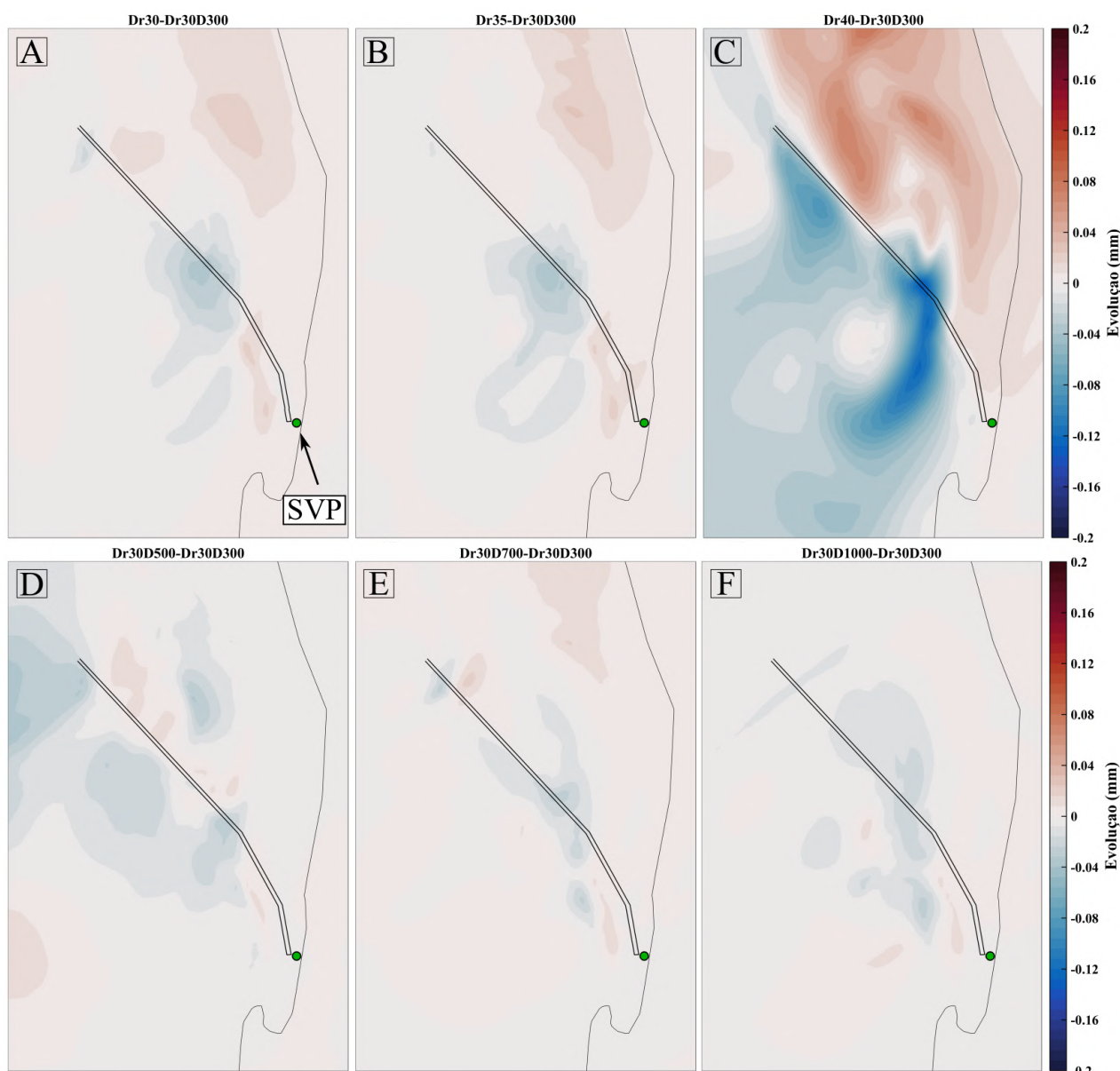


Figura 5.19 – Diferenças na evolução morfológica após 5 anos de simulação entre o cenário de referência (Dr30D300) com os demais para CSVP.

resultados mostraram que essa configuração de canal, provocou um maior assoreamento nos extremos norte e sul do canal e uma menor deposição ao centro. Mas, na média geral, este teve uma taxa de sedimentação de 0,2892% menor do que o cenário base, entretanto na região que apresentou uma deposição menor do que o cenário base é uma área de maior profundidade, por consequência ele tem uma menor periodicidade entre dragagens. Já na região mais rasa, onde há menores intervalos de tempo entre as atividades, houve um aumento na deposição dos sedimento em relação ao cenário de referência. Em vista disso, essa estratégia não é a mais interessante a ser adotada.

Tabela 5.3 – Diferenças entre as variáveis hidro-morfodinâmicas de todos os cenários modelados no CSVP.

CSVP						
Cenários	Velocidade		Tensão		Evolução	
	Média (m.s ⁻¹)	Desvio (%)	Média (N.m ⁻²)	Desvio (%)	Final (mm)	Desvio (%)
Dr30	0,0671	-0,7154	0,037	-1,3321	1,9469	+0,2266
Dr35	0,0659	-2,3906	0,035	-6,6242	1,9484	+0,3038
Dr40	0,0649	-3,9588	0,0333	-11,1271	1,9369	-0,2892
Dr30D300	0,0676	Referência	0,0375	Referência	1,9425	Referência
Dr30D500	0,0675	-0,1424	0,0374	-0,1937	1,9412	-0,0671
Dr30D700	0,0677	0,2154	0,0377	0,5871	1,9421	-0,0205
Dr30D1000	0,0672	-0,4964	0,0371	-0,91404	1,9423	-0,0109

Ao analisar os cenários que consideraram as atividades de bota-fora (Dr30D500, Dr30D700 e Dr30D1000) é observado que os padrões são semelhantes entre si. Entretanto, no geral, eles tiveram taxas de deposição inferiores ao cenário base, cujos valores podem ser vistos claramente nos quadros inferiores da Fig.5.19. É válido destacar que a adoção da região de bota-fora mais distantes do canal de navegação promoveu uma diminuição do assoreamento, conforme os resultados expostos na Tab.5.3. Mediante o exposto, o cenário que teve maior assoreamento é o Dr35, este provocou um aumento de +0,3038%, já o menor valor foi observado no cenário Dr30D500, demonstrando uma redução na evolução do canal de navegação. Portanto, é possível concluir que a configuração com o canal de navegação com profundidade de 3m e a região de bota-fora distante 500m da hidrovia é a mais adequada quando se busca reduzir a quantidade e a periodicidade entre as operação de dragagem. No entanto, ao ser adotada o custo com transporte pode aumentar, portanto, é necessário uma análise mais profunda para avaliar o custo-benefício da mudança da operação.

6. CONCLUSÃO

A Lagoa Mirim é um ambiente dinâmico que possui diversos agentes forçadores, como a ação variável dos ventos, descargas e flutuações de nível de outros ambientes, como a Lagoa dos Patos. Devido a sua localização e suas características distintas de geomorfologia e de padrões de circulação, este ambiente possui grande complexidade.

Devido ao fato de que há uma quantidade relativamente pequena de trabalhos publicados e informações sobre processos que ocorrem nessa laguna, o uso de modelagem numérica é uma alternativa de baixo custo e eficiente para o estudo e compreensão de diversos fenômenos. Desso modo, foi possível analisar os padrões das propriedades hidro-morfodinâmicas e avaliar a eficiência de estratégias de dragagem através do uso de simulações numéricas utilizando o sistema de modelagem TELEMAC-2D, SISYPHE e NESTOR com 5 anos de duração.

Além disso, foi comprovado os impactos nas variáveis hidro-morfodinâmicas causadas por obras de dragagem, como também foi possível avaliar diferentes configurações de canal e de regiões de bota-fora para comprovar a eficiência das intervenções projetadas pelo DNIT (2014) para os canais de navegação que cruzam esta laguna.

Portanto, de acordo com os objetivos específicos definidos, podem ser destacados como as principais conclusões obtidas nesse trabalho são:

1. Caracterizar a hidrodinâmica da Lagoa Mirim:

- Os resultados mostraram que o Rio Cebollati é o tributário mais importante em termos de volume de água do sistema LM-CSG, ele contribuiu com 53,24% de todo o volume de água que alimenta a LM, e sendo seguindo pelo rio Tacuari com 24,79% e pelo Jaguarão com 21,96%;
- A descarga calculada da LM para o CSG teve valores que oscilaram entre $168 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e $3.440 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, com uma média de $1640 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, enquanto que a vazão média que entra no sistema é de $2926 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Assim, a LM se comporta como um grande reservatório de água, pois ela retém um grande volume ao longo do tempo;
- A análise da variabilidade temporal da descarga da LM mostrou que a vazão dos tributários controlam a variabilidade em escalas de tempo que vão de intra-sazonais a anuais, e a ação dos ventos contribuem em ciclos com amplitudes de 2 a 15 dias;
- O vento é responsável pela modulação do nível de água na parte sul da LM. Esse desnível apresenta um comportamento sazonal, onde os maiores valores são no verão e na primavera,

e sua atenuação ocorre no outono e inverno. Além disso, o padrão espacial responde rapidamente as mudanças nas direções e podem estabelecer inclinações de até 2 m entre as extremidades da LM;

- A velocidade das correntes no corpo lagunar é influenciada tanto pelas descargas dos rios quanto pela força de gradiente de pressão barotrópico, que se desenvolve pelo desnível de água sobre a laguna. A atuação dos ventos causam um padrão de transporte bem definido, onde podemos destacar a formação de vórtices na região do extremo sul e na margem da região mais larga do setor norte;
- Durante eventos de baixa descarga a circulação é principalmente dirigida pela ação dos ventos, quando os ventos são de nordeste as correntes percorrem as áreas rasas nesse mesmo sentido, enquanto que nas áreas profundas as correntes são direcionadas no sentido oposto, estabelecendo uma circulação longitudinal bidimensional, também podemos destacar a intensificação dos vórtices que recirculam no sentido horário. Adicionalmente, o oposto ocorre quando os ventos são de sudoeste;
- As descargas controlam a circulação da LM em períodos de alta vazão, os ventos tem papel secundário no movimento da água, sendo apenas um agente modulador cujo efeito é desenvolver células de recirculação. Entretanto, embora a ação dos ventos promovam inclinações no nível de água entre as extremidades, e criem células de recirculação, isso não muda a orientação do escoamento em direção a LP, mesmo sob condições de vento do quadrante norte.

2. Quantificar as mudanças morfológicas espaciais e temporais do complexo Lagoa Mirim:

- O padrão de deposição médio do sedimento ao longo de todo o domínio da Lagoa Mirim é um produto do balanço entre os processos de erosão e deposição. A deposição prevalece nas regiões de menor hidrodinâmica e maiores profundidades. Sendo a erosão e o transporte de sedimentos são significativamente induzidos por períodos de alta vazão dos rios e são apenas modulado pela ação dos ventos;
- As principais áreas de erosão estão concentradas nas regiões das desembocaduras dos rios, no CSG e em suas proximidades, isso é devido a alta vazão e por suas configurações estreitas que provocam uma intensificação das velocidades de corrente, que por consequência aumentam a tensão de cisalhamento de fundo e a capacidade de erosão;
- Na área dos canais fluviais a erosão atuou principalmente na fração silte, que foi removido e transportado pelas correntes até o fundo lagunar onde a ressuspensão é limitada. Uma

vez que as partículas finas de sedimentos adentram na laguna, elas rapidamente decantam por floculação;

- Dois padrões de deposição distintos são observados: o primeiro está associado com a batimetria da laguna, onde é possível observar que há uma predominância de silte no piso lagunar, podendo compor em até 70% essas áreas mais profundas, enquanto que nas regiões marginais, as fácies deposicionais são dominadas pela igual proporção entre os sedimentos arenoso e silteoso; o segundo padrão é relacionado a distribuição espacial das frações, que apresentam 3 setores com padrões distintos, o norte, o central e o sul;
- O setor central é a que possui maior acumulação de silte, alcançando valores de até 70% nessa área, enquanto que o setor norte tem composição de até 60% e o sul de 55% na quantidade de silte muito fino. Esse zoneamento se dá devido a distinção entre as características hidrodinâmicas de cada um desses setores e também está relacionado com distância deles e dos tributários, que são as fontes dos sedimentos;
- A região central da laguna apresentou maior valor de deposição, com valores de 13,5 cm, enquanto que nos setores norte e sul, mais especificamente nos CS e CSVP a evolução foi de respectivamente 1,2 e 0,15 cm;
- Durante eventos de descarga alta é observado uma intensificação no transporte de sedimentos. Entretanto, uma restrição da circulação é imposta pelos jatos provocados pelos rios fazendo com que as partículas suspensas fiquem aprisionadas no setor central, o que reflete na taxa de sedimentação, pois esse efeito promove grande deposição no centro da LM.

3. Simular diferentes cenários de dragagem e despejo de material para avaliar uma melhor estratégia de gerenciamento dos sedimentos:

- O modelo NESTOR foi capaz de executar com precisão os diferentes cenários de dragagem e despejo de material propostos pra minimizar o assoreamento dos canais de navegação da Hidrovia da Lagoa Mirim;
- A eficiência das estratégias de dragagem e de bota-fora dependem das mudanças hidromorfodinâmicas causadas pelas diferentes geometrias dos canais e dos locais propostos como sítios de despejo. Mesmo quando a eficiência dessa estratégia é limitada, ela pode fornecer orientações sobre a melhor forma de remover sedimentos de um sistema submetido a acreção sedimentar;
- Os resultados hidro-morfodinâmicos mostraram que não houve grandes diferenças entre a eficiência das distintas estratégias de dragagem e despejo de material na LM. Para o CS

a melhor estratégia foi a de referência, ou seja o cenário Dr30D300. Já para o CSVP o cenário Dr30D500 foi escolhido como o melhor, embora ele não tenha sido o que provocou uma maior redução em média, mas quando analisamos os pontos críticos para a navegação e dragagem, considerando este o mais eficiente;

- A evolução do fundo depois do cenário dragado é mais intensa do que o cenário não dragado, foi estimado um aumento de 52,52% e 14,24% na evolução dos CS e CSVP, respectivamente. Esse efeito deve ser cuidadosamente analisado quando as operações de dragagem na LM forem planejadas, pois as cotas de profundidade não serão alcançadas se esse assoreamento estimado dos setores dragados não for levado em consideração.

7. LIMITAÇÕES DO ESTUDO E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

7.1. Limitações do estudo

O estudo realizado neste trabalho considerou algumas simplificações que limitaram a análise de alguns processos nos resultados obtidos.

- A utilização de dados batimétricos mais atuais que as cartas náuticas seria uma importante melhoria para este sistema de modelagem por conta da relação de dependência entre as variáveis hidrodinâmicas e morfodinâmicas;
- A utilização de um modelo hidrodinâmico tridimensional para melhor representar os processos que envolvem a ação das correntes secundárias;
- A não inclusão do efeito de ondas na modelagem hidro-morfodinâmica, visto que esse processo é um muito importante para o transporte e ressuspensão dos sedimentos;
- O estudo considerou apenas a ressuspensão dos sedimentos, portanto não há cargas sedimentares em suspensão ou de fundo para os rios e para o CSG;
- O processo de consolidação de sedimentos não foi considerado neste estudo, dessa forma, os resultados obtidos para a evolução do fundo podem estar subestimados em setores onde os processos de consolidação de sedimentos são importantes para a manutenção do comportamento do transporte sedimentar;
- O estudo considerou a utilização de apenas duas classes sedimentares (areia muito fina e silte muito fino). De fato essa consideração limita o estudo para a análise da distribuição das frações sedimentares dentro da Lagoa Mirim. Porém, um maior número de classes de sedimentos demandaria um maior custo computacional para a realização das simulações numéricas;
- O modelo NESTOR não considera o tipo de draga que é utilizada nas operações e também não considera a taxa com que o material é dragado do fundo, limitando análises mais criteriosas sobre os efeitos da dragagem na hidrodinâmica local. Ele também não considera a ressuspensão e dispersão dos sedimentos ocasionadas pelas operações de dragagem e despejo.

7.2. Propostas para trabalhos futuros

- Sugere-se primeiramente a utilização de dados batimétricos mais atuais possível para o estudo que se deseja realizar. Pois a batimetria é influenciada pelos cálculos realizados pelos modelos. Além

- de obviamente caracterizar de forma mais realista o ambiente dentro do sistema computacional;
- Sugere-se a utilização de um modelo hidrodinâmico tridimensional acoplado com um modelo de ondas de águas rasas para melhor representar os processos hidrodinâmicos na Lagoa Mirim;
 - Sugere-se estimar as cargas transportadas pelos rios para dentro da Lagoa Mirim, esse estudo pode combinar a utilização de modelagem hidro-sedimentológica e observações de campo;
 - Sugere-se aprimorar o acoplamento do modelo hidrodinâmico com o modelo morfodinâmico, para que o processo de consolidação dos sedimentos seja considerado em simulações futuras;
 - Sugere-se adicionar mais classes sedimentares as próximas simulações a fim de representar melhor a distribuição sedimentar que compõe o fundo da laguna. Recomenda-se o uso de no mínimo 3 classes, representando os sedimentos coesivos, finos e grossos.

8. REFERÊNCIAS

- AGENCY, C. I. **The CIA world factbook 2010**. Skyhorse Publishing Inc., 2009.
- ALAM, S. E MATIN, M. A. Application of 2D Morphological Model to Assess the Response of Karnafuli River due to Capital Dredging. **Journal of Water Resources and Ocean Science**, v. 2, n. 3, p. 40, 2013.
- ALEKSEENKO, E., ROUX, B., SUKHINOV, A., KOTARBA, R., E FOUGERE, D. Nonlinear hydrodynamics in a mediterranean lagoon. **Nonlinear Processes in Geophysics**, v. 20, n. 2, 2013.
- ALFREDINI, P. E ARASAKI, E. **Engenharia Portuária**. Blucher, São Paulo, 2014.
- ALPERS, C. N., HUNERLACH, M. P., MAY, J. T., E HOTHEM, R. L. Mercury Contamination from Historical Gold Mining in California. **Publications of the US Geological Survey**, v. 61, n. October, p. 7, 2005.
- ÁLVAREZ, M., CARBALLO, R., RAMOS, V., E IGLESIAS, G. An integrated approach for the planning of dredging operations in estuaries. **Ocean Engineering**, v. 140, n. August 2016, p. 73–83, 2017.
- ANTAQ. Anuário. Technical report, Agência Nacional de Transportes Aquaviários, Brasília, 2016.
- ANTIPOV, V., YUANTIPOV, V., BRAKKER, I., BRENNER, V., NAUMOV YU, N., PUSHKAREV, A., PUSHKAREV, V., PODKOLZIN, A., E ZHABIN, A. Channel dredging method, involves cutting ground with working blades of mechanical cutting tools installed on rotary cutting head, which performs horizontal intermittent movement in both directions transversely to axis of rotation. **RU122595**, 2006.
- ARFI, R., GUIRAL, D., E BOUVY, M. Sedimentation modified by wind induced resuspension in a shallow tropical lagoon (cote d’ivoire). **Netherland Journal of Aquatic Ecology**, v. 28, n. 3-4, p. 427–431, 1994.
- AZAMBUJA, J. L. F. D., 2005. **Hidrovia Da Lagoa Mirim : Um Marco De Desenvolvimento Nos Caminhos Do Mercosul**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- BARREIRO, M. Influence of enso and the south atlantic ocean on climate predictability over southeastern south america. **Climate dynamics**, v. 35, n. 7-8, p. 1493–1508, 2010.

- BARROS, G. P. E MARQUES, W. C. Long-term temporal variability of the freshwater discharge and water levels at patos lagoon, rio grande do sul, brazil. **International Journal of Geophysics**, 2012.
- BEK, M., LOWNDES, I., HARGREAVES, D., E NEGM, A. Basics of lake modelling with applications, 2018.
- BELTRAME, L. F. S. E TUCCI, C. E. M. Estudo para avaliação e gerenciamento da disponibilidade hídrica da Bacia da Lagoa Mirim. **Instituto de Pesquisas Hidráulicas/UFRGS, Porto Alegre**, 1998.
- BLAZQUEZ, C. A., ADAMS, T. M., E KEILLOR, P. Optimization of mechanical dredging operations for sediment remediation. **Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering**, v. 127, n. 6, p. 299–307, 2001.
- BLENINGER, T., 2006. **Coupled 3D hydrodynamic models for submarine outfalls: Environmental hydraulic design and control of multiport diffusers**. Tese, University Karlsruhe.
- BOUCHETTE, F., SCHUSTER, M., GHIENNE, J.-F., DENAMIEL, C., ROQUIN, C., MOUSSA, A., MARSALEIX, P., E DURINGER, P. Hydrodynamics in holocene lake mega-chad. **Quaternary Research**, v. 73, n. 2, p. 226–236, 2010.
- BRAY, N. **Dredging for development (fifth edition)**. Número 95. International Association of Dredging Companies, 2004.
- BRAY, R. N., BATES, A., E LAND, J. **Dredging: a handbook for engineers**, 1997.
- BRENDEL, A. E. Some Comments on the Evaluation of Transducer Performance. **Experimental Techniques**, v. 7, n. 5, p. 20–21, 1983.
- BRITISH STANDARD. Maritime structures – Part 5: Code of practice for dredging and land reclamation, 1991.
- CHAI, T. E DRAXLER, R. R. Root mean square error (rmse) or mean absolute error (mae)?–arguments against avoiding rmse in the literature. **Geoscientific model development**, v. 7, n. 3, p. 1247–1250, 2014.
- CLM, C. D. L. M. Barragem do São Gonçalo: Estudo Preliminar de Viabilidade . Technical report, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, Brazil, 1970.

- CNT. Pesquisa CNT da navegação interior 2013. Technical report, Confederação Nacional do Transporte, Brasília, 2013.
- COSTI, J., MARQUES, W. C., KIRINUS, E. P., DUARTE, R. F., E ARIGONY-NETO, J. Water level variability of the Mirim - São Gonçalo system, a large, subtropical, semi-enclosed coastal complex. **Advances in Water Resources**, v. 117, p. 75–86, 2018.
- COSTI, J., OLEINIK, P. H., MONTEIRO, C. B., MARQUES, W. C., E ARIGONY-NETO, J. An automated structure for acquiring and processing sentinel-1 data and its applicability for coastal studies. In **Defect and Diffusion Forum**, volume 372, pp. 122–131. Trans Tech Publ, 2016.
- CROWE, S. E., GAYES, P. T., VISO, R. F., BERGQUIST, D. C., JUTTE, P. C., E VAN DOLAH, R. F. Impact of the Charleston Ocean Dredged Material Disposal Site on nearby hard bottom reef habitats. **Marine Pollution Bulletin**, v. 60, n. 5, p. 679–691, 2010.
- CSANADY, G. Wind-induced barotropic motions in long lakes. **Journal of Physical Oceanography**, v. 3, n. 4, p. 429–438, 1973.
- DABERNIG, M., MAYR, G. J., E MESSNER, J. W. Predicting wind power with reforecasts. **Weather and Forecasting**, v. 30, n. 6, p. 1655–1662, 2015.
- DELTARES, D. Delft3d-flow simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena including sediments, user manual, 2014.
- DIAS, J. M. E LOPES, J. F. Implementation and assessment of hydrodynamic, salt and heat transport models: The case of Ria de Aveiro Lagoon (Portugal). **Environmental Modelling and Software**, v. 21, n. 1, p. 1–15, 2006.
- DILLENBURG, S. R. E BARBOZA, E. G. The strike-fed sandy coast of southern brazil. **Geological Society, London, Special Publications**, v. 388, n. 1, p. 333–352, 2014.
- DILLENBURG, S. R., BARBOZA, E. G., ROSA, M. L. C., CARON, F., E SAWAKUCHI, A. O. The complex prograded cassino barrier in southern brazil: Geological and morphological evolution and records of climatic, oceanographic and sea-level changes in the last 7–6 ka. **Marine Geology**, v. 390, p. 106–119, 2017.

- DNIT. TOMO I - Estudo Ambiental (EI): Dragagens do Canal do Sangradouro e so Canal de Santa Vitória do Palmar, visando a reativação da Hidrovia d Lagoa Mirim. Technical report, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT, Brasília/DF, 2014.
- DU, Y. E LI, H. Mechanical technology for dyke reinforcement by sediment discharge in the lower reaches of the yellow river. **Yellow River Conservancy Press, Chengdong Lu, Zhengzhou, Henan**, v. 450004, 2010.
- DUARTE, R., 2013. **Monitoramento das áreas úmidas e inundadas adjacentes ao Canal São Gonçalo com uma série de imagens ERS-1/2 SAR e Envisat ASAR adquiridas entre 1992 e 2007**. Tese, Dissertação de Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Geografia
- ERFTEMEIJER, P. L. E LEWIS III, R. R. R. Environmental impacts of dredging on seagrasses: a review. **Marine pollution bulletin**, v. 52, n. 12, p. 1553–1572, 2006.
- ERFTEMEIJER, P. L., RIEGL, B., HOEKSEMA, B. W., E TODD, P. A. Environmental impacts of dredging and other sediment disturbances on corals: a review. **Marine pollution bulletin**, v. 64, n. 9, p. 1737–1765, 2012.
- EURPEAN COMMISSION. **Key figures on Europe 2011**. Office of the European Union, Luxembourg, 2011.
- FERNANDES, E. H., DYER, K. R., E NIENCHESKI, L. F. H. Calibration and Validation of the TELEMAC-2D Model to the Patos Lagoon (Brazil). **Journal of Coastal Research**, , n. 34, p. 470–488, 2001.
- FERNÁNDEZ-FERNÁNDEZ, S., SILVA, P., FERREIRA, C., RIBEIRO, A., ABREU, T., ROMÃO, S., BAPTISTA, P., FONTÁN BOUZAS, A., DIAS, J., COELHO, C., E BERNARDES, C. Assessment of Dredging/Dumping Scenarios for Figueira da Foz Coastal Region (W Portugal). **Journal of Coastal Research**, v. 2, p. 1266–1270, 2018.
- FERRARIN, C. E UMGIESSER, G. Hydrodynamic modeling of a coastal lagoon: the cabras lagoon in sardinia, italy. **Ecological Modelling**, v. 188, n. 2-4, p. 340–357, 2005.
- FOX, D. G. Judging air quality model performance: A summary of the ams workshop on dispersion model performance, woods hole, mass., 8–11 september 1980. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 62, n. 5, p. 599–609, 1981.

- FRAGOSO, C., VAN NES, E., JANSE, J., E DA MOTTA MARQUES, D. Potential effects of climate change and eutrophication on a large subtropical shallow lake. **Environ. Modell. Softw.**, v. 26, p. 1337–1348, 2011.
- FRAGOSO JR, C., SOUZA, R., SOUZA, C., E REIS, R. Uma análise na dragagem do complexo estuarino-lagunar mundaú/manguaba em alagoas através de um modelo numérico hidrodinâmico bidimensional-resultados preliminares. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, pp. 21–31, 2004.
- GARCÍA-OLIVA, M., PÉREZ-RUZAFÁ, Á., UMGIESSER, G., MCKIVER, W., GHEZZO, M., DE PASCALIS, F., E MARCOS, C. Assessing the hydrodynamic response of the Mar Menor lagoon to dredging inlets interventions through numerical modelling. **Water (Switzerland)**, v. 10, n. 7, 2018.
- GARCÍA-RODRÍGUEZ, F., BRUGNOLI, E., MUNIZ, P., VENTURINI, N., BURONE, L., HUTTON, M., RODRÍGUEZ, M., PITA, A., KANDRATAVICIUS, N., PÉREZ, L., ET AL. Warm-phase enso events modulate the continental freshwater input and the trophic state of sediments in a large south american estuary. **Marine and Freshwater Research**, v. 65, n. 1, p. 1–11, 2014.
- GIUNTA, G., MARIANI, P., MONTELLA, R., E RICCIO, A. ppom: A nested, scalable, parallel and fortran 90 implementation of the princeton ocean model. **Environmental Modelling & Software**, v. 22, n. 1, p. 117–122, 2007.
- GOES FILHO, H. D. A., 2004. **Dragagem e gestão dos sedimentos**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- GOUVÊA, T., ZARNOT, D. H., E ALBA, J. M. F. Caracterização geoambiental e histórico do processo de desenvolvimento da bacia da Lagoa Mirim. . Technical report, Embrapa Clima Temperado, Pelotas, 2010.
- GRIMM, A. M. E SABOIA, J. P. Interdecadal variability of the south american precipitation in the monsoon season. **Journal of Climate**, v. 28, n. 2, p. 755–775, 2015.
- GÜLER, Ç. U., JOHNSON, A. W., E COOPER, M. Case study: energy industry economic impacts from ohio river transportation disruption. **The Engineering Economist**, v. 57, n. 2, p. 77–100, 2012.
- HAO, H., GENG, Y., LI, W., E GUO, B. Energy consumption and ghg emissions from china's freight transport sector: scenarios through 2050. **Energy Policy**, v. 85, p. 94–101, 2015.

- HAYES, D. F. Anticipating sediment resuspension and contaminant release during environmental dredging operations. In **ymp. on Envir. Dredging, Erie County Environmental Education Institute, Buffalo**, New York, 1992.
- HERVOUET, J.-M. TELEMAC modelling system: an overview. **Hydrological Processes**, v. 14, n. 13, p. 2209–2210, 2000.
- HERVOUET, J.-M. **Hydrodynamics of free surface flows: modelling with the finite element method**, volume 360. Wiley Online Library, 2007.
- HIGHLEY, D., HETHERINGTON, L., BROWN, T., HARRISON, D., E JENKINS, G. The strategic importance of the marine aggregate industry to the UK, Research Report OR/07/019. HR, 2007.
- HIRATA, E. F., MÖLLER, O. O., E MATA, M. M. Regime shifts, trends and interannual variations of water level in Mirim Lagoon, southern Brazil. **Pan-American Journal of Aquatic Sciences**, v. 5, n. 2, p. 254–266, 2010.
- HU, K. E DING, P. The effect of deep waterway constructions on hydrodynamics and salinities in yangtze estuary, china. pp. 961–965. JSTOR, 2009.
- IBGE. Uso da terra no estado do Rio Grande do Sul, 2010.
- IRGA, I. R. G. D. A. Arroz Irrigado - Safra 2005/2006 - Produção Municipal, 2006.
- JACOBSEN, F. E RASMUSSEN, E. Mike 3 mt: A 3-dimensional mud transport model. **Technical rep. DG-12 to the commission of the european communities, Danish Hydraulic Institute, Hørsholm, Denmark**, 1997.
- JE, C. H., HAYES, D. F., E KIM, K. S. Simulation of resuspended sediments resulting from dredging operations by a numerical flocculent transport model. **Chemosphere**, v. 70, n. 2, p. 187–195, 2007.
- JEYAR, M., CHAABELASRI, E., E SALHI, N. Numerical investigation of new alternative Nador lagoon inlet relocation. **International Journal of Fluid Mechanics Research**, v. 42, n. 5, p. 449–462, 2015.
- JIANG, C., DE SWART, H. E., LI, J., E LIU, G. Mechanisms of along-channel sediment transport in the North Passage of the Yangtze Estuary and their response to large-scale interventions Topical Collection on the 11th International Conference on Cohesive Sediment Transport. **Ocean Dynamics**, v. 63, n. 2-3, p. 283–305, 2013.

- JULIEN, P. Y. **Erosion and sedimentation**. Cambridge University Press, 2010.
- KEILLOR, P. J. Obstacles to the remediation of contaminated soils and sediments in North America at reasonable cost. In **CATS (Characterization and Treatment of Sludges) II Congr.: Characterization and Treatment of Contaminated Dredged Material, Royal Society of Flemish Engineers**, Antwerp, Belgium, 1993.
- KIRINUS, E. D. P., OLEINIK, P. H., COSTI, J., E MARQUES, W. C. Long-term simulations for ocean energy off the brazilian coast. **Energy**, v. 163, p. 364–382, 2018.
- KJERFVE, B. Comparative Oceanography of Coastal Lagoons. **Estuarine Variability**, pp. 63–81, 1986.
- KJERFVE, B. **Coastal lagoon processes**. Elsevier, 1994.
- KJERFVE, B. E MAGILL, K. E. Geographic and hydrodynamic characteristics of shallow coastal lagoons. **Marine geology**, v. 88, n. 3-4, p. 187–199, 1989.
- KLEIN, J. Sediment dredging and macrophyte harvest as lake restoration techniques. **Land and Water**, v. 42, n. 3, p. 10–12, 1998.
- KUNZE, H., BOHN, E., E BAHRKE, G. Effects of psychotropic drugs on prostaglandin biosynthesis in vitro. **Journal of Pharmacy and Pharmacology**, v. 27, n. 11, p. 880–881, 1975.
- LAMBERT, B. The economic role of inland water transport. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Civil Engineering**, v. 163, n. 5, p. 8–14, 2010.
- LANCKRIET, T., DEPREITER, D., E HOLLAND, G. V. Equilibrium-Type Response Model for the Sediment Volume of Dredging and Disposal Areas. **Ocean Eng**, v. 143, n. 5, p. 1–13, 2017.
- LEEuw, J., SHANKMAN, D., WU, G., DE BOER, W. F., BURNHAM, J., HE, Q., YESOU, H., E XIAO, J. Strategic assessment of the magnitude and impacts of sand mining in poyang lake, china. **Regional Environmental Change**, v. 10, n. 2, p. 95–102, 2010.
- LEVINE, R. A. E WILKS, D. S. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. **Journal of the American Statistical Association**, v. 95, n. 449, p. 344, 2000.
- LOWE, D. Inland Waterway, Short-Sea, and Coastal Shipping. **Intermodal Freight Transport**, pp. 92–109, 2005.

- LUAN, H. L., DING, P. X., WANG, Z. B., YANG, S. L., E LU, J. Y. Morphodynamic impacts of large-scale engineering projects in the yangtze river delta. **Coastal Engineering**, v. 141, p. 1–11, 2018.
- MACHADO, A. A., CALLIARI, L. J., MELO FILHO, E., E KLEIN, A. H. D. F. Historical assessment of extreme coastal sea state conditions in southern brazil and their relation to erosion episodes. **Pan-American Journal of Aquatic Sciences**, v. 5, n. 2, p. 105–114, 2010.
- MAERKER, C., 2013. **Die numerische Simulation von Nassbaggerstrategien im Kontext der Optimierung von Unterhaltungsmaßnahmen für die Schifffahrt**. Doctoral thesis, Universitätsbibliothek der Universität der Bundeswehr München.
- MAERKER, C. E MALCHEREK, A. The simulation tool DredgeSim – Predicting dredging needs in 2- and 3-dimensional models to evaluate dredging strategies. In **Bundesanstalt für Wasserbau**, pp. 1639–1645, 2010.
- MAHEU, C., CAZENAVE, A., E MECHOSO, C. R. Water level fluctuations in the plata basin (south america) from topex/poseidon satellite altimetry. **Geophysical research letters**, v. 30, n. 3, 2003.
- MAIER, E., COSTI, J., BARREIRA, S., E SIMÕES, J. Precipitação na américa do sul: médias climáticas e padrões de variabilidade no período entre 1979 e 2008. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 1, p. 32–46, 2016.
- MALHADAS, M. S., NEVES, R., SILVA, A., E LEITÃO, P. C. Effect of the bathymetric changes on the hydrodynamic and residence time in Óbidos Lagoon (Portugal). **Journal of Coastal Research**, v. 56, n. SPEC. ISSUE 56, p. 549–553, 2009.
- MANAP, N. E VOULVOULIS, N. Environmental management for dredging sediments - The requirement of developing nations. **Journal of Environmental Management**, v. 147, p. 338–348, 2015.
- MARQUES, W. C. The temporal variability of the freshwater discharge and water levels at the patos lagoon, brazil. **International Journal of Geosciences**, v. 3, n. 4, p. 758–766, 2012.
- MARQUES, W. C., FERNANDES, E. H., MORAES, B. C., MÖLLER, O. O., E MALCHEREK, A. Dynamics of the patos lagoon coastal plume and its contribution to the deposition pattern of the southern brazilian inner shelf. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 115, n. C10, 2010.

- MARTELO, A. F., 2019. **Estudo hidro-morfodinâmico do estuário da Lagoa dos Patos: a modelagem numérica como ferramenta para avaliar os impactos de operações de dragagem no canal de acesso ao Porto de Rio Grande**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande.
- MEHTA, A. J., HAYTER, E. J., PARKER, W. R., KRONE, R. B., E TEETER, A. M. Cohesive sediment transport. i: Process description. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 115, n. 8, p. 1076–1093, 1989.
- MIHIC, S., GOLUSIN, M., E MIHAJLOVIC, M. Policy and promotion of sustainable inland waterway transport in europe–danube river. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 15, n. 4, p. 1801–1809, 2011.
- MILANKOVIĆ, J., PAVIĆ, D., ĐORĐEVIĆ, J., DRAGIN, A., VUČKOVIĆ, S. Đ., E MÉSZÁROS, M. The danube inland waterway transport and its role in serbia’s economic development. **R-Economy**, v. 4, n. 3, p. 105–114, 2018.
- MÖLLER, O. O., CASTAING, P., SALOMON, J.-C., E LAZURE, P. The influence of local and non-local forcing effects on the subtidal circulation of patos lagoon. **Estuaries**, v. 24, n. 2, p. 297–311, 2001.
- MOLLER, O. O., LORENZZENTTI, J. A., STECH, J. L., E MATA, M. M. The Patos Lagoon summertime circulation and dynamics. **Continental Shelf Research**, v. 16, n. 3, p. 335–351, 1996.
- MUNAR, A. M., CAVALCANTI, J. R., BRAVO, J. M., FAN, M., MOTTA-MARQUES, D., RUBERTO, C., E JR, F. Coupling large-scale hydrological and hydrodynamic modeling : Toward a better comprehension of watershed- shallow lake processes. **Journal of Hydrology**, 2018.
- NARITA, D., TOL, R. S., E ANTHOFF, D. Damage costs of climate change through intensification of tropical cyclone activities: An application of fund. **Climate Research**, v. 39, n. 2, p. 87–97, 2009.
- NIELSEN, J. L. Electrofishing California’s Endangered Fish Populations. **Fisheries Managment**, v. 23, n. 12, p. 1–7, 1998.
- OFFICE OF THE SECRETARY OF TRANSPORTATION. Transportation Statistics Annual Report 2018. Technical report, U.S. Department of Transportation, Washington, DC, 2018.

- OLIVEIRA, H., FERNANDES, E., MÖLLER, O., E GARCÍA-RODRÍGUEZ, F. Relationships between wind effect, hydrodynamics and water level in the world's largest coastal lagoonal system. **Water**, v. 11, n. 11, p. 2209, 2019.
- OLIVEIRA, H. A., FERNANDES, E. H. L., MÖLLER, O. O. J., E COLLARES, G. L. Processos Hidrológicos e Hidrodinâmicos da Lagoa Mirim. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos Versão**, v. 20, p. 34–45, 2015.
- OZTANRISEVEN, F. E NACHTMANN, H. Economic impact analysis of inland waterway disruption response. **Engineering Economist**, v. 62, n. 1, p. 73–89, 2017.
- PAARLBERG, A. J., GUERRERO, M., HUTHOFF, F., E RE, M. Optimizing dredge-and-dump activities for river navigability using a hydro-morphodynamic model. **Water**, v. 7, n. 7, p. 3943–3962, 2015.
- PAPANICOLAOU, A. T. N., ELHAKEEM, M., KRALLIS, G., PRAKASH, S., E EDINGER, J. Sediment transport modeling review—current and future developments. **Journal of hydraulic engineering**, v. 134, n. 1, p. 1–14, 2008.
- PARISE, C. K., CALLIARI, L. J., E KRUSCHE, N. Extreme storm surges in the south of brazil: atmospheric conditions and shore erosion. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 57, n. 3, p. 175–188, 2009.
- PASQUINI, A. I., NIENCHESKI, L. F., E DEPETRIS, P. J. The enso signature and other hydrological characteristics in patos and adjacent coastal lagoons, south-eastern brazil. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 111, p. 139–146, 2012.
- PENG, W., SHUAI, C. F., E XIN, X. Yangtze river:China's goldenwater way. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Civil Engineering**, v. 163, n. 5, p. 15–18, 2010.
- PIELKE, R. A. Mesoscale Meteorological Modeling. **Mesoscale Meteorological Modeling**, v. 78, p. 1–612, 2013.
- PIOLA, A. R., MATANO, R. P., PALMA, E. D., MÖLLER JR, O. O., E CAMPOS, E. J. The influence of the plata river discharge on the western south atlantic shelf. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. 1, 2005.

- PION, L. M. E BERNARDINO, J. Dredging Volumes Prediction for the Access Channel of Santos Port Considering Different Design Depths. **TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation**, v. 12, n. 3, p. 505–514, 2018.
- PROTOPAPAS, A., KRUSE, C. J., E OLSON, L. E. Modal comparison of domestic freight transportation effects on the general public. **Transportation research record**, v. 2330, n. 1, p. 55–62, 2013.
- REYES-MERLO, M., ORTEGA-SÁNCHEZ, M., DÍEZ-MINGUITO, M., E LOSADA, M. A. Efficient dredging strategy in a tidal inlet based on an energetic approach. **Ocean and Coastal Management**, v. 146, p. 157–169, 2017.
- RIJN, L. C. V. Sediment transport, part ii: suspended load transport. **Journal of hydraulic engineering**, v. 110, n. 11, p. 1613–1641, 1984.
- ROCHA, C. H., SILVA, G. L., E DE ABREU, L. M. Analysis of the evolution of Brazilian ports' environmental performances. **Journal of Integrated Coastal Zone Management**, v. 18, n. 2, p. 103–109, 2018.
- ROSA, M. L. C., BARBOZA, E. G., MENEGON, B. S., FROTA, P. C., E ANONI, R. A. Geological evolution and inundation hazard: an analysis through geotechnologies. **Journal of Coastal Research**, v. 75, n. sp1, p. 1227–1232, 2016.
- ROSMAN, P. Referência técnica do sisbahia–sistema base de hidrodinâmica ambiental. Technical report, Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia, 2000.
- SANTIAGO, M., POUHEY, J., ROCHA, C., PORTELINHA, M., FERNANDES, J., E PIEDRAS, S. O nível de água e a produção pesqueira na Lagoa Mirim. . Technical report, Embrapa Clima Temperado, Pelotas, Brazil, 2010.
- SANTOS, I. R., BAISCH, P., LIMA, G. T. N. P., E SILVA FILHO, E. V. Nutrients in surface sediments of Mirim lagoon , Brazil- Uruguay border. **Acta Limnology**, v. 16, n. 1, p. 85–94, 2004.
- SATO, S. E ISOBE, M. **International Compendium of Coastal Engineering**. World Scientific, 2015.

- SCHILLER, R. V., CECILIO, R. O., FERNANDES, E. H. L., SCHILLER, R. V., E CECILIO, R. O. Morphologically induced changes in the circulation of the Patos Lagoon estuary. **Journal of Coastal Research SI**, v. 39, n. 39, p. 1556–1559, 2006.
- SEELIGER, U. ET AL. **Os ecossistemas costeiro e marinho do extremo sul do Brasil**. Número 504.42 ECO, 1998.
- SEMA. Technical report, Secretaria do Meio Ambiente do Estado do Rio Grande do Sul (SEMA), Porto Alegre, Brazil, 2006.
- SILVA, D. V. D., OLEINIK, P. H., COSTI, J., DE PAULA KIRINUS, E., E MARQUES, W. C. Residence time patterns of Mirim Lagoon (Brazil) derived from two-dimensional hydrodynamic simulations. **Environmental Earth Sciences**, v. 78, n. 5, p. 163, 2019.
- SMITH, N. P. **Water, salt and heat balance of coastal lagoons**, volume 60. Elsevier Oceanographic Series, 1994.
- SPAGNOLI, F., SPECCHIULLI, A., SCIROCCO, T., CARAPPELLA, G., VILLANI, P., CASOLINO, G., SCHIAVONE, P., E FRANCHI, M. The Lago di Varano: Hydrologic characteristics and sediment composition. **Marine Ecology**, v. 23, n. SUPPL. 1, p. 384–394, 2002.
- STANISZEWSKA, M., BONIECKA, H., E CYLKOWSKA, H. **Environmental aspects of dredging technology**, volume 32. CRC Press, 2017.
- STREET, E. E HARRIES, O. a Primer for. Technical Report January, HydroQual, 1991.
- SUEDEL, B. C., KIM, J., CLARKE, D. G., E LINKOV, I. A risk-informed decision framework for setting environmental windows for dredging projects. **Science of the Total Environment**, v. 403, n. 1-3, p. 1–11, 2008.
- SUTHERLAND, J., PEET, A., E SOULSBY, R. Evaluating the performance of morphological models. **Coastal engineering**, v. 51, n. 8-9, p. 917–939, 2004.
- TASSI, P. E VILLARET, C. Sisyphe v6.3 User's Manual. Technical report, EDF, Chateau, France, 2014.
- TEATINI, P., ISOTTON, G., NARDEAN, S., FERRONATO, M., MAZZIA, A., DA LIO, C., ZAGGIA, L., BELLAFIORE, D., ZECCHIN, M., BARADELLO, L., CELLONE, F., CORAMI, F., GAMBARO,

- A., LIBRALATO, G., MORABITO, E., VOLPI GHIRARDINI, A., BROGLIA, R., ZAGHI, S., E TOSI, L. Hydrogeological effects of dredging navigable canals through lagoon shallows. A case study in Venice. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 21, n. 11, p. 5627–5646, 2017.
- TOLDO JR, E. Morfodinâmica da laguna dos patos, rio grande do sul. **Pesquisas em Geociências**, v. 18, n. 1, p. 58–63, 1991.
- TOLDO JR, E., DILLENBURG, S., CORRÊA, I., ALMEIDA, L., WESCHENFELDER, J., E GRUBER, N. Sedimentação de longo e curto período na lagoa dos patos, sul do brasil. **Pesquisas em Geociências**, v. 33, n. 2, p. 79–86, 2006.
- TOMAZELLI, L. J., DILLENBURG, S. R., E VILLWOCK, J. A. Late quaternary geological history of rio grange do sul coastal plain, southern brazil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 30, n. 3, p. 474–476, 2017.
- TURNER, T. M. **Fundamentals of Hydraulic Dredging**. American Society of Civil Engineers, second ediª edição, 1996.
- UFPR/ITTI. Hidrovia Paraguai-Paraná: Produto 1B - Análise dos Custos de Transporte, Levantamento das Empresas de Navegação e Estaleiro. Technical report, Universidade Federal do Paraná. Instituto Tecnológico de Transportes e Infraestrutura, Curitiba, 2014.
- UMGIESSER, G., FERRARIN, C., CUCCO, A., DE PASCALIS, F., BELLAFIORE, D., GHEZZO, M., E BAJO, M. Comparative hydrodynamics of 10 mediterranean lagoons by means of numerical modeling. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 119, n. 4, p. 2212–2226, 2014.
- U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. Dredging and dredged material disposal. Technical report, U.S. Army Corps of Engineers, 1983.
- VAN MAREN, D. S., OOST, A. P., WANG, Z. B., E VOS, P. C. The effect of land reclamations and sediment extraction on the suspended sediment concentration in the Ems Estuary. **Marine Geology**, v. 376, p. 147–157, 2016.
- VAN OOSTRUM, R. W. Dredging contaminated sediments in the Netherlands. In **Proc., Int. Symp. on Envir. Dredging**, Erie County Environmental Education Institute, Buffalo, New York, 1992.

- VAN RIJN, L. C., WASLTRA, D. J., GRASMEIJER, B., SUTHERLAND, J., PAN, S., E SIERRA, J. P. The predictability of cross-shore bed evolution of sandy beaches at the time scale of storms and seasons using process-based profile models. **Coastal Engineering**, v. 47, n. 3, p. 295–327, 2003.
- VAN'T HOFF, J. E VAN DER KOLFF, A. N. **Hydraulic fill manual: for dredging and reclamation works**, volume 244. CRC press, 2012.
- VIEIRA, H., WESCHENFELDER, J., FERNANDES, E. H., OLIVEIRA, H. A., MÖLLER, O. O., E GARCÍA-RODRÍGUEZ, F. Links between surface sediment composition, morphometry and hydrodynamics in a large shallow coastal lagoon. **Sedimentary Geology**, pp. 105591, 2020.
- VIEIRA, H. M., 1995. **Contribuição ao estudo da sedimentologia da Lagoa Mirim-RS**. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- VILLARET, C., HERVOUET, J., HUYBRECHTS, N., VAN, L., E DAVIES, A. Effect of bed friction on morphodynamic modelling: Application to the central part of the gironde estuary. In **Proceedings of the River, Coastal and Estuarine Morphodynamics Conference**, pp. 899–90, 2009.
- WANG, S. L. E SCHONFELD, P. Scheduling interdependent waterway projects through simulation and genetic optimization. **Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering**, v. 131, n. 3, p. 89–97, 2005.
- WEBB, B. M. E MARR, C. Spatial variability of hydrodynamic timescales in a broad and shallow estuary: Mobile bay, alabama. **Journal of Coastal Research**, v. 32, n. 6, p. 1374–1388, 2016.
- WENTWORTH, C. K. A scale of grade and class terms for clastic sediments. **The journal of geology**, v. 30, n. 5, p. 377–392, 1922.
- WIEGMANS, B. E KONINGS, R. **Inland waterway transport: Challenges and prospects**. Routledge, New York, 2016.
- WILSON, C., BATES, P., E HERVOUET, J.-M. Comparison of turbulence models for stage-discharge rating curve prediction in reach-scale compound channel flows using two-dimensional finite element methods. **Journal of Hydrology**, v. 257, n. 1-4, p. 42–58, 2002.
- WINTERWERP, J. C. E WANG, Z. B. Man-induced regime shifts in small estuaries - I: Theory. **Ocean Dynamics**, v. 63, n. 11-12, p. 1279–1292, 2013.

- ZHU, J., WEISBERG, R. H., ZHENG, L., E HAN, S. Influences of channel deepening and widening on the tidal and nontidal circulations of tampa bay. **Estuaries and Coasts**, v. 38, n. 1, p. 132–150, 2015.
- ZORAS, S., TRIANTAFYLLOU, A., E HURLEY, P. Grid sensitivity analysis for the calibration of a prognostic meteorological model in complex terrain by a screening experiment. **Environmental Modelling & Software**, v. 22, n. 1, p. 33–39, 2007.