



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

ANALISE NUMÉRICA DAS ALTERAÇÕES NO
PADRÃO DE FORMAÇÃO, COMPORTAMENTO E
DESTINO DA PLUMA DA LAGOA DOS PATOS
EM FUNÇÃO DA OBRA DE MODERNIZAÇÃO
DOS MOLHES DA BARRA DO RIO GRANDE

Nágila Veiga Adrião Monteiro

Orientadores:

Prof. Dr. Wiliam Correa Marques (*In memorian*)
e Prof. Dr. Liércio André Isoldi

Co-orientadoras:

Profa. Dra. Elisa Helena Leão Fernandes
e Dra. Juliana Costi

Rio Grande
Janeiro de 2022

Nágila Veiga Adrião Monteiro

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestra em Modelagem Computacional, pelo Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional da Universidade Federal do Rio Grande.

Rio Grande
Janeiro de 2022

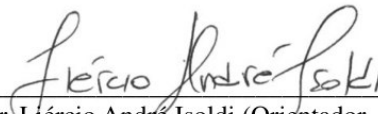
Nágila Veiga Adrião Monteiro

**“ANÁLISE NUMÉRICA DAS ALTERAÇÕES NO PADRÃO DE FORMAÇÃO,
COMPORTAMENTO E DESTINO DA PLUMA DA LAGOA DOS PATOS EM FUNÇÃO DA
OBRA DE MODERNIZAÇÃO DOS MOLHES DA BARRA DO RIO GRANDE”**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional da Universidade Federal do Rio Grande - FURG, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestra. Área de concentração: Modelagem Computacional.

Aprovada em:

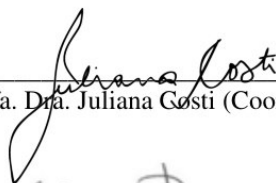
BANCA EXAMINADORA



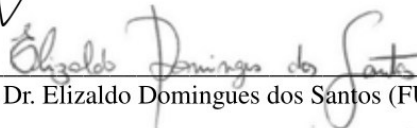
Prof. Dr. Liércio André Isoldi (Orientador – FURG)



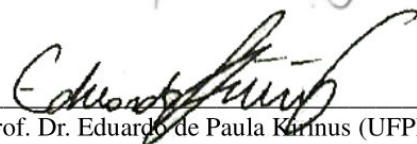
Profa. Dra. Elisa Helena Leão Fernandes (Coorientadora – FURG)



Profa. Dra. Juliana Gosti (Coorientadora – FURG)



Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos (FURG)



Prof. Dr. Eduardo de Paula Kurmus (UFPR)

Rio Grande - RS
2022

Ficha Catalográfica

M775a Monteiro, Nágila Veiga Adrião.
Análise numérica das alterações no padrão de formação, comportamento e destino da pluma da Lagoa dos Patos em função da obra de modernização dos Molhes da Barra do Rio Grande / Nágila Veiga Adrião Monteiro. – 2022.
102 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, Rio Grande/RS, 2022.
Orientador: Dr. William Correa Marques (In memoriam).
Orientador: Dr. Liércio André Isoldi.
Coorientadora: Dra. Elisa Helena Leão Fernandes.
Coorientadora: Dra. Juliana Costi.

1. Modelagem Numérica 2. Pluma Costeira 3. Molhes da Barra I. Marques, William Correa II. Isoldi, Liércio André III. Fernandes, Elisa Helena Leão IV. Costi, Juliana V. Título.

CDU 519.6

Catálogo na Fonte: Bibliotecário José Paulo dos Santos CRB 10/2344

Agradecimentos

Apesar de considerar o processo de escrita muito solitário, com muitos momentos introspectivos e também de ócio. Gostaria de agradecer aos meus pais, Maria Antônia, mãe, professora, historiadora, sem ela eu se quer seria. Ao Anastácio, pela confiança, companheirismo, carinho e amor em forma de comida. A minha irmã Nara, que me ensina sua calma, sabedorias e determinação e que nesse meio tempo também, nos presenteou com a pessoa mais bela e curiosa que já conheci, nossa Heloísa. Sem os cuidados deles, inspirações e apoio eu não estaria aqui. Aos meus bisavôs e avôs, que emanam energia onde quer que estejam.

A Beth, Bitá e sua família que me acolheram desde o início dessa jornada em Rio Grande. Aos amigos, Álvaro, pela companhia e pelo ombro amigo. A Mauren, Alejandra e Bruna, por compartilharem sonhos e cansaços. Aos que reencontrei, Raylton, tornando a rotina em Rio Grande suportável, pelas rotinas de Matlab e sua amizade. Vocês facilitaram essa experiência! Aos que permanecem distantes, mas próximos em simultâneo, Alessandra, minha prima, Mariana, Beatriz e Clarice, o casal que admiro. A minha psicóloga, Juliana, por ajudar a me enxergar e ser uma pessoa melhor.

Ao meu ex-orientador, Prof. Dr. Wiliam Correa Marques, vítima de Covid-19, que me deu a oportunidade de fazer parte de seus projetos e do Laboratório LANSO. A toda equipe técnica do CESUP-UFRGS, que deram todo suporte enquanto utilizei o serviço dos supercomputadores, principalmente ao Lindolfo Meira e ao Luís Fernando Fernandez. Ao meu orientador, Prof. Dr. Liércio, pelo apoio, compreensão, orientações, correções, críticas e conselhos. As coorientadoras, Dra. Juliana Costi, pela orientação, pelas caronas, chaves emprestadas, ajuda com Matlab. A Profa. Dra. Elisa Fernandes, por acreditar em mim e dar o suporte com o laboratório LOCOSTE e também pela colaboração do MSc. Pablo da Silva, pela paciência, ensinamentos, etc. O trabalho em equipe, proporcionou a conclusão desse estudo. Aos membros da banca por aceitarem participar do processo de defesa, Prof. Dr. Eduardo e Prof. Dr. Elizaldo, pela disponibilidade e contribuições.

Agradeço a Marinha do Brasil por disponibilizar as cartas náuticas utilizadas para compor o banco de dados batimétrico deste trabalho. A NOAA, HYCOM, ECMWF por fornecerem dados globais de extrema qualidade livremente. Agradeço enormemente ao consórcio *Open-TELEMAC-MASCARET* por disponibilizarem o modelo TELEMAC gratuito em sua plenitude, além de estabelecerem um marco de desenvolvimento e crescimento de seus usuários através das imensas inovações promovidas pelo consórcio.

Ao nosso Estado democrático, pelo investimento em educação através da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior — Brasil (CAPES) — Código de Financiamento 001.

A família Maciel, que me acolheu nos últimos tempos: Sra. Vera e Sr. Hermano, que me deram carinho, conselhos, espaço para criar, me ensinarem seus valores e crenças. Ao Rafael, pelo companheirismo. A minha gata Lua, que me traz leveza nessa vida.

Esse título é de todos nós!

"Brasileiro, deixe a ficha cair: você não é apenas sobrevivente de uma pandemia, você é sobrevivente de uma política de extermínio."
Canal Meteoro Brasil, 2021

RESUMO

A pluma costeira proveniente do estuário da Lagoa dos Patos, em Rio Grande, no Rio Grande do Sul, influencia diretamente as águas costeiras da plataforma do Atlântico Sul. Sua atuação ocasiona variações de concentração de material em suspensão, turbidez e salinidade, que podem afetar a produtividade biológica, a qualidade da água e os interesses econômicos do Porto de Rio Grande. Visando proporcionar melhorias na navegabilidade dos navios que entram no Porto de Rio Grande, foram construídas na desembocadura da Lagoa dos Patos estruturas costeiras, chamado Molhes da Barra. Um destes molhes está localizado na costa do município de São José do Norte, a leste, e o outro a oeste, em Rio Grande, com extensões iniciais de 4.2 km e 3.5 km, respectivamente, constituindo o chamado Cenário I neste estudo. Em 2010, os molhes passaram por obras de modernização para ampliar as atividades portuárias locais, quando houve um prolongamento de 370 m no molhe leste e 700 m no molhe oeste, dando origem ao Cenário II deste estudo. O objetivo deste trabalho é analisar as alterações no padrão de formação, comportamento e destino da pluma nos dois cenários de configuração dos molhes, em períodos de baixa e de alta descarga da lagoa. Para isso, foram realizadas simulações numéricas com o sistema de modelagem *Open TELEMAC-MASCARET*, contando com o módulo hidrodinâmico acoplado ao módulo de transporte de material em suspensão. O modelo hidrodinâmico passou por calibração dos dados de velocidade de corrente na superfície e do fundo da Lagoa dos Patos, com *Relative Mean Absolute Error* considerado bom e *Root Mean Square Error* excelente. Na sequência, o modelo foi validado, utilizando dados de salinidade do período de janeiro de 2017, demonstrando boa correlação entre os dados medidos e os resultados simulados. Para estudo de caso, foi anteposto o ano de 2015, associado à ocorrência do fenômeno *El Niño* - Oscilação sul. Para a análise dos resultados foram selecionados dois períodos de descarga nas simulações, um de baixa e um de alta descarga. Ambos os períodos permitiram observar padrões no comportamento da pluma da Lagoa dos Patos. Foram analisadas médias de superfície e séries temporais de variáveis como salinidade, elevação da superfície livre, velocidade de corrente, sedimento em suspensão e o fluxo de deposição de sedimentos, a partir de pontos extraídos e perfis próximo à desembocadura. Junto às médias dos resultados extraídos, aplicou-se a correlação de Sperman e diagramas de caixa com mínimo, máximo, primeiro e terceiro quartil e mediana, os quais forneceram variáveis quantitativas para análise dos cenários e períodos. A análise do período de baixa descarga foi importante para observar a salinidade. Já o período de alta descarga foi importante para analisar o comportamento do sedimento em suspensão e o fluxo de deposição próximo à desembocadura nos cenários. A descarga dos tributários é o fator prioritário controlando a formação da pluma costeira da Lagoa dos Patos e sua extensão. O vento, no que lhe concerne, tem influência na dinâmica da pluma. Em ambos os cenários e períodos estudados, há um direcionamento da pluma para o sudoeste da desembocadura. Ao examinar a salinidade, a pluma de campo próximo se mostra menor no Cenário II, o que sugere um aumento de corrente, menor pressão na desembocadura, turbulência no campo de ressuspensão e mistura no campo distante em relação ao Cenário I. A presença dos molhes favorece a formação de vórtices anticiclônicos na plataforma, evidenciado na alta descarga, próximo à desembocadura, favorecendo o fluxo de deposição do sedimento suspenso na zona de recirculação e dificultando o transporte do sedimento para o campo distante.

Palavras-Chave: Modelagem Numérica, Pluma Costeira, Molhes da Barra.

ABSTRACT

The coastal plume of the Patos Lagoon estuary, in the Rio Grande, Rio Grande do Sul, directly influences the coastal waters of the South Atlantic platform, causing variations in the concentration of suspended material and turbidity, which can affect the biological productivity, water quality and economic interests of the Port of the Rio Grande. With the aim of improving the navigability of ships entering the Port of the Rio Grande, coastal structures known as Barra Breakwaters were built at the mouth of the Patos Lagoon. One of these piers is located on the coast of the municipality of São José do Norte, to the east, and the other to the west, in the Rio Grande, with initial lengths of 4.2 km and 3.5 km, respectively, building the so-called Scenario I in this study. In 2010, the piers underwent modernization works to expand local port activities, when there was an extension of 370 m in the east pier and 700 m in the west pier, giving rise to Scenario II in this study. The objective of this paper is to analyze the changes in the plume formation pattern, behavior and fate of the plume in the two pier configuration scenarios, in a period of low and high discharge of the lagoon. For this purpose, numerical simulations were performed with the Open TELEMAC-MASCARET modeling system, relying on the hydrodynamic module coupled to the suspended material transport module. The hydrodynamic model went through calibration of the current velocity data at the surface and at the bottom of the Patos Lagoon, with Relative Mean Absolute Error equal to good and Root Mean Square Error equal to excellent. Following this, the model was validated using salinity data from the January 2017 period, demonstrating good correlation between measured data and simulated results. For the case study, the year 2015 was put forward, associated with the occurrence of the El Niño - Southern Oscillation phenomenon. For the analysis of the results, two periods of discharge in the simulations were selected, one of low and one of high discharge the simulations. Both periods allowed patterns to be observed in the behavior of the Lagoa dos Patos plume. Analyzing surface averages and time series of variables such as salinity, free surface elevation, current velocity, suspended sediment and the sediment deposition flux, from extracted points and profiles near the mouth. Along with the averages of the extracted results, Sperman's correlation was applied and box diagrams with minimum, maximum, first and third quartile and median, will provide quantitative variables for analysis of the scenarios and periods. The low discharge was important to observe the variables of salinity and wind currents, while the high discharge was important to analyze the behavior of suspended sediment and the deposition flow near the mouth in the scenarios. The formation of the coastal plume of the Lagoa dos Patos is a result of the discharge intensity, which induces the size of the plume and suffers contributions from the wind current for its dynamics. It was observed that between the scenarios, the free jet provided by the mouth directs the plume to the southwest in both extracted periods. When examining salinity, the near-field plume is shown to be smaller in Scenario II, which suggests increased current, lower pressure at the mouth, turbulence in the resuspension field, and mixing in the far field compared to Scenario I, contributing to the isohaline and thermohaline of the ocean. The presence of the jetties favors the formation of anticyclonic vortices on the shelf, evidenced in the high discharge, near the mouth, favoring the deposition flow of suspended sediment in the recirculation zone and hindering the transport of sediment to the far field. Contributing, consequently, modifying the coastline upstream of the mouth with deposition and with erosion downstream.

Keywords: Numerical Modeling, Coastal Plume, Barra Jetties.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE SÍMBOLOS	xii
LISTA DE ABREVIATURAS	xiii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Contextualização	6
1.1.1 Estrutura da pluma costeira: formação, comportamento e destino	6
1.1.2 Plumões de pequena escala	8
1.1.3 As estruturas costeiras, controle de sedimentos e jatos turbulentos . . .	14
1.2 Contribuições para o estado da arte	17
1.3 Objetivo geral	21
1.3.1 Objetivos específicos	21
1.4 Lagoa dos Patos e a plataforma continental sul do Brasil	21
2 MODELO NUMÉRICO: TELEMAT-3D	26
2.1 Condições iniciais e de contorno do módulo hidrodinâmico	29
2.1.1 Fronteiras oceânicas	30
2.1.2 Fronteira superficial	31
2.1.3 Fronteiras continentais	31
2.1.4 Parâmetros físicos considerados nas simulações	31
2.1.5 Malha de elementos finitos e triangulares	32
2.2 Módulo SEDI-3D	35
2.2.1 Fundamento teórico	35
2.2.2 Parâmetros para a simulação com material em suspensão (silte fino) . .	37
2.3 Calibração e validação do modelo hidrodinâmico	38
2.3.1 Calibração do modelo	39
2.3.2 Validação do modelo	43
2.4 Estudo de Caso	44
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
3.1 Formação da pluma	48
3.2 Formação da pluma de sedimento	56
3.3 Comportamento e destino da pluma	65
4 CONCLUSÃO	82
4.1 Sugestões para trabalhos futuros	84
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fatores que podem influenciar a pluma.	7
Figura 2 – Esquema horizontal de distribuição da pluma	9
Figura 3 – Esquema vertical de mistura da pluma	13
Figura 4 – Esquema de um jato livre e seu sistema de coordenadas.	17
Figura 5 – Área da interface de estudo, Molhes da Barra, RS.	23
Figura 6 – Cenários de estudo propostos, com as alterações dos Molhes da Barra, Rio Grande.	23
Figura 7 – Fluxograma dos processos de simulações com o TELEMAC-3D e SEDI-3D. . .	27
Figura 8 – Localização das fronteiras abertas nas malhas e as condição de contorno inseridas no modelo: vento, salinidade, corrente, maré, descarga e a concentração de material em suspensão.	30
Figura 9 – Exemplo de interação dos elementos infinitos e triangulares de 4 elementos e 7 nós.	33
Figura 10 – Malha Triangular de elementos finitos e suas diferenças para o estudo. . . .	34
Figura 11 – Calibração da evolução temporal da intensidade de corrente calculada pelo modelo.	42
Figura 12 – Validação do TELEMAC-3D utilizando o resultado de salinidade.	43
Figura 13 – Pontos de coleta de dados no estuário da Lagoa dos Patos para calibração e validação do modelo TELEMAC-3D.	44
Figura 14 – Eventos de <i>El niño</i> para os anos de 2008-2015, Na Figura 24, que mostra que a deposição de sedimento no período 1, observamos que o dia-apresentando: Anomalia de descarga, Vento, Taxas de precipitação e Índice de Oscilação Sul (IOS).	45
Figura 15 – Série temporal descarga para os três principais tributários da Lagoa dos Patos, para o ano de 2015.	46
Figura 16 – Pontos de extração de dados para series temporais e média da superfície para ambas as malhas simuladas (A). Os mesmos pontos fora usados para extrair o transecto para observar os resultados das simulações (B).	47
Figura 17 – Descarga total da Lagoa dos Patos e os resultados de salinidade superficial do modelo nos pontos extraídos.	48
Figura 18 – Concentração de salinidade na superfície para o Cenário I (A) e o Cenário II (B) no período de baixa descarga. Diagrama de <i>box plot</i> para cada um dos pontos extraídos nos cenários para o Cenário I (C) e o Cenário II (D). Com valores de mínimos e máximos, primeiro e terceiro quartil e mediana do conjunto de valores.	50
Figura 19 – Concentração de salinidade na superfície para o Cenário I (A) e o Cenário II (B) no período de alta descarga. Diagrama de <i>box plot</i> para cada um dos pontos extraídos nos cenários para o Cenário I (C) e o Cenário II (D), com valores de mínimos e máximos, primeiro e terceiro quartil e mediana do conjunto de valores.	50
Figura 20 – Distribuição vertical da salinidade nos transectos sul – norte, durante período de baixa descarga, para o CI (A) e CII (B). Em C está representada a diferença entre os dois cenários	53

Figura 21 – Distribuição vertical da salinidade nos transectos leste - oeste, durante período de baixa descarga, para o CI (A) e CII (B). Em C está representada a diferença entre os dois cenários.	53
Figura 22 – Distribuição vertical da salinidade nos transectos sul – norte, durante período de alta descarga, para o CI (A) e CII (B). Em C está representada a diferença entre os dois cenários.	54
Figura 23 – Distribuição vertical da salinidade nos transectos leste - oeste, durante período de alta descarga, para o CI (A) e CII (B). Em C está representada a diferença entre os dois cenários.	54
Figura 24 – Concentração de sedimento em suspensão na superfície e fluxo de deposição de sedimento dos pontos extraídos, para Cenário I (A) e Cenário II (B); diferenças entre as séries, para sedimento em suspensão (C) e para o fluxo de deposição de sedimentos (D).	56
Figura 25 – Concentração de sedimento em suspensão para o Cenário I (A) e o Cenário II (B) no período de baixa descarga. Diagrama de <i>box plot</i> para cada um dos pontos extraídos para o Cenário I (C) e o Cenário II (D). Com valores de mínimos e máximos, primeiro e terceiro quartil e mediana do conjunto de valores.	58
Figura 26 – Concentração de sedimento na superfície para o Cenário I (A) e o Cenário II (B) no período de alta descarga. Diagrama de <i>box plot</i> para cada um dos pontos extraídos nos cenários Para o Cenário I (C) e o Cenário II (D). Com valores de mínimos e máximos, primeiro e terceiro quartil e mediana do conjunto de valores.	59
Figura 27 – Perfis de sedimento suspenso na superfície no sentido sul – norte do local de estudo, no período de baixa descarga. Em (A) é possível observar o resultado para o Cenário I, em (B) para o Cenário II e em (C) a diferença entre os dois cenários. . . .	60
Figura 28 – Perfis de sedimento suspenso na superfície no sentido sul – norte do local de estudo, no período de alta descarga. Em (A) é possível observar o resultado para o Cenário I, em (B) para o Cenário II e em (C) a diferença entre os dois cenários. . . .	61
Figura 29 – Perfis de sedimento suspenso na superfície no sentido leste – leste, no período de baixa descarga. Em (A) é possível observar o resultado para o Cenário I, em (B) para o Cenário II e em (C) a diferença entre os dois cenários.	62
Figura 30 – Perfis de sedimento suspenso na superfície no sentido sul – norte, no período de alta descarga. Em (A) podemos observar o resultado para o Cenário I, em (B) para o Cenário II e em (C) a diferença entre os dois cenários.	63
Figura 31 – Correlações Spearman entre as variáveis: concentração de sedimento de superfície (SS) nos pontos extraídos, média da velocidade de corrente (ACV) e descarga total (TD), para o Cenário I.	64
Figura 32 – Correlações Spearman entre as variáveis: concentração de sedimento de superfície (SS) nos pontos extraídos, média da velocidade de corrente (ACV) e descarga total (TD), para o Cenário II.	64
Figura 33 – Rosas-dos-ventos das correntes de ventos do período de baixa descarga (A) e período de alta descarga (B).	65
Figura 34 – Média da elevação da superfície do mar para o Cenário I (A) e o Cenário II (B) no período de baixa descarga. Diagrama <i>box plot</i> para cada um dos pontos extraídos no Cenário I (C) e no Cenário II (D), com valores mínimos e máximos, primeiro e terceiro quartil e mediana do conjunto de valores (baixa descarga).	66

Figura 35 – Média da elevação da superfície do mar para o Cenário I (A) e o Cenário II (B) no período de alta descarga. Diagrama <i>box plot</i> para cada um dos pontos extraídos no Cenário I (C) e no Cenário II (D), com valores mínimos e máximos, primeiro e terceiro quartil e mediana do conjunto de valores (alta descarga).	67
Figura 36 – Perfis de velocidade média no sentido sul – norte no período de baixa descarga. Em (A) podemos observar o resultado para o Cenário I, em (B) para o Cenário II e em (C) a diferença entre os dois cenários.	68
Figura 37 – Perfis de velocidade média no sentido oeste – leste no período de baixa descarga. Em (A) podemos observar o resultado para o Cenário I, em (B) para o Cenário II e em (C) a diferença entre os dois cenários.	69
Figura 38 – Perfis de velocidade média no sentido sul – norte no período de alta descarga. Em (A) podemos observar o resultado para o Cenário I, em (B) para o Cenário II e em (C) a diferença entre os dois cenários.	70
Figura 39 – Perfis de velocidade média no sentido oeste – leste no período de alta descarga. Em (A) podemos observar o resultado para o Cenário I, em (B) para o Cenário II e em (C) a diferença entre os dois cenários.	70
Figura 40 – Correlações Spearman entre as variáveis: de elevação da superfície livre nos pontos extraídos (SSH), média da velocidade de corrente (ACV) e a descarga total (TD), para o Cenário I.	73
Figura 41 – Correlações Spearman entre as variáveis: de elevação da superfície livre nos pontos extraídos (SSH), média da velocidade de corrente (ACV) e a descarga total (TD), para o Cenário II.	73
Figura 42 – Concentração de fluxo de deposição de sedimento para o Cenário I (A) e o Cenário II (B) no período de baixa descarga. Diagrama <i>box plot</i> para cada um dos pontos extraídos nos cenários para o Cenário I (C) e o Cenário II (D). Com valores de mínimos e máximos, primeiro e terceiro quartil e mediana do conjunto de valores. . .	74
Figura 43 – Concentração de fluxo de deposição de sedimento para o Cenário I (A) e o Cenário II (B) no período de alta descarga. Diagrama de <i>box plot</i> para cada um dos pontos extraídos nos cenários para o Cenário I (C) e o Cenário II (D). Com valores de mínimos e máximos, primeiro e terceiro quartil e mediana do conjunto de valores. . .	75
Figura 44 – Concentração do fluxo de deposição de sedimentos com a intensidade de corrente no período de baixa descarga para Cenário I (A) e Cenário II (B).	77
Figura 45 – Concentração de fluxo de deposição de sedimentos com a intensidade de corrente no período de alta descarga para Cenário I (A) e Cenário II (B).	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Qualificação <i>Relative Mean Absolute Error (RMAE)</i>	39
Tabela 2 – Parâmetros testados na calibração do modelo	40
Tabela 3 – Qualificação dos resultados	42
Tabela 4 – Resultados das simulações de estudo de caso para os dados de salinidade superficial nos períodos de estudo	51
Tabela 5 – Resultados das simulações de estudo de caso para os dados de sedimento de suspensão e de fluxo de deposição nos períodos de estudo	57
Tabela 6 – Resultados do diagrama para os dados de sedimento de suspensão e de fluxo de deposição nos períodos de estudo	76

LISTA DE SÍMBOLOS

f_{ω}	Coeficiente de Coriolis (s.u.)
R	Coeficiente de correlação (s.u.)
ν_{τ}	Coeficientes de difusão do rastreador (m^2/s)
x	Componentes do espaço horizontal (m)
y	Componentes do espaço horizontal (m)
z	Componente de espaço vertical (m)
r	Dado observado
m	Dado modelado
$\rho_{0(x)}$	Densidade de referência (g/L)
D	Descarga (L)
S_r	Desvios-padrão dos dados observados (s.u.)
S_m	Desvios-padrão dos dados modelados (s.u.)
ε	Dissipação turbulenta (s.u.)
S	Elevação de superfície livre (m)
k	Energia turbulenta (s.u.)
u'_t	Flutuação turbulenta da velocidade (m/s)
h	Fluxo verticalmente homogêneo (m)
F_x	Força na direção x (N)
F_y	Força na direção y (N)
$\mathbb{Q}$	Fonte do traçador ou dissipador do rastreador (s.u.)
p_h	Pressão hidrostática (Pa)
p_d	Pressão dinâmica (Pa)
$p(x)$	Pressão (Pa)
$p_{atm}(x)$	Pressão atmosférica (atm)
h	Profundidade da água (m)
Z_f	Profundidade do fundo (m)
T	Rastreador passivo ou afetando a densidade (s.u.)
t	Tempo (s)
T	Traçador passivo ou ativo (s.u.)
ω	Velocidade angular da Terra (m/s)
ν_c	Velocidade e coeficientes de difusão do traçador (m/s^2)
u	Velocidades de corrente na direção x (m/s^2)
v	Velocidades de corrente na direção y (m/s^2)
w	Velocidades de corrente na direção z (m/s^2)

LISTA DE ABREVIATURAS

ADCP *Acoustic Doppler Current Profiler*

ADP Sontek *Acoustic Doppler Profiler*

ALM *Agência da Lagoa Mirim*

ANA *Agência Nacional das Águas*

CI *Cenário I*

CII *Cenário II*

CESUP *Centro Nacional de Supercomputação*

CTD *Conductivity Temperature Depth*

Delft-3d *Deltares Tree Dimension*

DP *Desvio padrão*

E *Leste*

ECMWF *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*

ERA-Interim *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Interim Reanalysis*

FURG *Universidade Federal do Rio Grande*

FVCOM *Finite Volume Coastal Ocean Model*

MIKE 21 *Flow Model*

FDS *Fluxo de Deposição de Sedimentos*

HYCOM *Hybrid Coordinate Ocean Model*

MOHID *Hydrodynamic Model*

INPE *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais*

ENSO *Oscilação Sul El Niño*

LANSD *Laboratório de Análise de Sistemas Dinâmicos*

Locoste *Laboratório de Oceanografia Costeira e Estuarina*

LNCC *Laboratório Nacional de Computação Científica*

MEF Método dos Elementos Finitos

MURD *Multidimensional Upwind Residual Distribution*

N Norte

LNSO Oscilação Sul *La Niña*

OTIS *Oregon State University Tidal Inversion System*

IPCC Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

PAS Plataforma Atlântica Sudoeste

PN Ponto Norte

PS Ponto Sul

PL Ponto Leste

PO Ponto Oeste

POM *Princeton Ocean Model*

PELD Projeto Pesquisa Ecológica de Longa Duração

RMAE Relative Mean Absolute Error

ROMS *Regional Ocean Modeling System*

RS Rio Grande do Sul

RMSE Root Mean Square Error

SSS Salinidade da Superfície do Mar

SAM-3D *Simulation d'Advection Multivariable*

SDumont Sistema Brasileiro de Computação Petaflopica

S Sul

SWAN *Simulated Waves Nearshore*

W Oeste

1 INTRODUÇÃO

Os ambientes costeiros são de grande importância global para a utilização de recursos naturais, sejam eles químicos, biológicos ou geofísicos, além de serem regiões de atividades humanas concentradas [DE SOUZA ET AL., 2011]. Na década de 90, com o crescente número de pesquisas relacionadas a mudanças globais do sistema terrestre, difundiram-se também estudos com foco em áreas da interface ar-terra-oceano.

A zona costeira e suas bacias hidrográficas relacionam-se funcionalmente por fluxos hidrológicos de água doce, sedimentos e substâncias dissolvidas, formando um contínuo fluvial-marinho costeiro [NICOLODI ET AL., 2009]. Cerca de 87% da superfície da Terra está conectada ao oceano por rios, recebendo um volume de cerca de $371\,000\text{ km}^3$, representando um terço da precipitação global que ocorre sobre os continentes [TRENBERTH ET AL., 2007].

O fornecimento de água doce pode modificar a composição química da plataforma continental, levando frequentemente ao aumento dos níveis de nutrientes nas águas a jusante da descarga dos rios. A influência é exercida também por estuários, enseadas e lagoas; estes estão situados na costa principal e possuem uma conexão livre, embora restrita, com o mar [POSTMA ET AL., 1987]. Além disso, a água de um rio ou de um estuário que chega em uma plataforma continental, ou em um mar semi-fechado, pode estar sob os efeitos das marés.

O escoamento do continente para a plataforma continental é principalmente de água doce do próprio rio sendo chamado pluma de rio [MANN AND LAZIER, 2006]. Em outras situações, há forte penetração da água salgada no vale do rio para formar um estuário, e o escoamento para a plataforma continental é de água do rio misturada com quantidades consideráveis de água salgada, constituindo a pluma estuarina [DE SOUZA ET AL., 2011].

A camada superficial onde está a pluma é uma aproximação da natureza a uma descontinuidade de contato na dinâmica de fluidos, formando frentes que têm uma escala horizontal de até 1.000 km e que persistem por períodos de alguns meses. Em geral, a água misturada do rio está presente apenas em 2 ou 3 m abaixo da superfície e forma uma pluma flutuante como resultado de sua menor salinidade (sua temperatura diferente contribui pouco para o contraste da massa específica) [GARVINE, 1987]. A entrada de água doce nos ecossistemas costeiros gera

alterações na dinâmica, potencializando os efeitos baroclínicos, e contribuindo para o aporte de materiais dissolvidos, em suspensão ou particulados (sedimentos, nutrientes e poluentes) [DE SOUZA ET AL., 2011].

Com relação à variável carga sedimentar, é possível separá-la em três categorias, sendo elas o transporte em suspensão, o de fundo e o em solução. Nos mares costeiros, como são chamadas as regiões de influência da água doce, os sedimentos em suspensão não são apenas transportados passivamente, mas também alteram o campo físico ao influenciar a densidade da água do ambiente, especialmente quando sedimentos em excesso são fornecidos ao mar nas cheias dos rios, e onde se espera que a mudança de campo físico devido à mudança de densidade por sedimentos em suspensão seja importante para as regiões de influência da água doce [DIGIACOMO ET AL., 2004]. Além disso, o material descarregado pelos afluentes pode levar vários anos para chegar à região da frente, estando sujeito a sucessivos ciclos de deposição-ressuspensão-advecção [HORNER-DEVINE ET AL., 2015].

Os principais parâmetros independentes que determinam a estrutura e a escala de plumas são as descargas de rios, geometria da foz do corpo hídrico, batimetria/geometria costeira, velocidades e direções das correntes costeiras, amplitude das marés, propriedades da água, tensão do vento e rotação da Terra [GARVINE, 1995; HORNER-DEVINE ET AL., 2015]. Quando a água superficial mais leve de um estuário ou rio flui para o oceano aberto, deixa para trás uma região estreita onde o fluxo é predominantemente bidimensional, e entra em um ambiente menos confinado, onde a força de Coriolis pode mudar a direção do fluxo [MANN AND LAZIER, 2006].

Mann and Lazier [2006] sugerem ainda que a mistura turbulenta e instabilidade de cisalhamento ocorrida na plataforma diz respeito à estrutura transversal da pluma, podendo variar marcadamente em função das flutuações na forçante de vento e ondas ao longo da costa. Tais afirmações vão de encontro com a dinâmica de deriva do número de Ekman¹, onde as correntes que ascendem espalham a pluma no mar, às vezes alargando-a para mais de 50 km em extensão marítima, enquanto os ventos favoráveis de afundamento estreitam a largura da pluma para apenas 10 km [FONG ET AL., 1997; MARQUES ET AL., 2010A]. No que lhe concerne, o

¹ A teoria do transporte Ekman explica o estado teórico de circulação, se as correntes de água foram impulsionadas apenas pela transferência de impulso do vento [TOMCZAK AND GODFREY, 1994]

sedimento em suspensão fica preso em zonas frontais, tanto em estuários como na plataforma interna, resultando muitas vezes em grandes aumentos na concentração de sedimento em suspensão em relação à fonte ribeirinha [PIOLA ET AL., 2005].

A plataforma continental do sul do Brasil, restrita nas latitudes de 28° ao norte e 35° ao sul, recebe contribuições do rio La Plata, um dos maiores rios do mundo e o segundo maior do hemisfério sul, além de contribuições do complexo Lagoa dos Patos - Lagoa Mirim. A pluma de água doce que se espalha ao longo das costas da Argentina, Uruguai e Brasil e no oceano profundo [COMBES AND MATANO, 2014], resulta em uma região com longas faixas de águas de baixa salinidade em regiões próximas à costa. Isto contribui para a manutenção de ambientes dinamicamente favoráveis à reprodução e desenvolvimento de espécies, sustentando padrões de transporte ou deposição de materiais [MARQUES ET AL., 2010B].

A Lagoa de Patos consiste em um sistema composto por rios a montante, com uma relação significativa entre a precipitação total na bacia hidrográfica e a vazão média anual da lagoa, com cerca de 2400 m³/s [ABREU ET AL., 2010]. Durante eventos de inundação, materiais suspensos são deslocados para fora dos limites da Lagoa. Os seus principais rios tributários são: ao norte, os Rios Jacuí, Taquarí, Caí, Sinos e Gravataí, que deságuam no Guaíba; na porção central, localiza-se a sub-bacia do rio Camaquã, que drena a região oeste do Rio Grande do Sul (RS). Ao sul, o sistema Patos-Mirim é conectado pelo Canal São Gonçalo, no município de Pelotas. Sendo assim, a Lagoa dos Patos é responsável por drenar uma área de cerca de 170 000 km² [MARTELO, 2019].

A conexão com o ambiente da plataforma ocorre através da geometria artificial dos Molhes da Barra de Rio Grande, cuja desembocadura atualmente tem 550 m de largura, construídos em 1915 e ampliados em 2010. A estrutura inibe a dinâmica da descarga fluvial, com alteração de salinidade e temperatura, vento e correntes litorâneas [ABREU ET AL., 2010].

Em Alves [2008], os autores relatam que os canais da Barra do Rio Grande e de São José do Norte não eram estáveis e estavam sujeitas a alterações de correnteza e dos ventos no decorrer do tempo. As grandes tormentas que, costumavam acontecer no inverno não ofereciam à costa boa navegabilidade, de modo que preferia-se navegar no verão, quando o tempo era mais constante, o que prejudicava o desenvolvimento econômico da região.

Os molhes são estruturas que se estendem em ângulo com o eixo principal, protegendo o canal de navegação e contribuindo para o crescimento dos portos. Estas são estruturas artificiais resistentes, servindo como ponto de referência para alterações hidrodinâmicas e morfodinâmicas do local, além de serem considerados patrimônios históricos, movimentam o turismo e proporcionam crescimento na zona costeira, responsáveis pelo crescimento econômico local [DUGAN ET AL., 2012].

Os modelos numéricos desenvolvidos nas últimas décadas conseguem simular ambientes dinâmicos com variáveis como correntes, ondas e o transporte de constituintes conservativos e não conservativos, em áreas estuarinas e de plataforma continental. Dentre tantos modelos relevantes, destacam-se:

O modelo POM de autor Blumberg and Mellor [1987]; o FVCOM para circulação estuarina, baseado em esquemas de volumes finitos, propostos por Ou et al. [2007]; o SWAN de Holthuijsen et al. [2003] para estudo de propagação de ondas em águas rasas. Também é possível citar o ROMS utilizado por Shchepetkin and McWilliams [2005]; o SAM-3D, para modelagem de pluma no rio Siene utilizado por Cugier and Le Hir [2002]; MIKE 21/3 desenvolvido pelo *DHI Water and Environment*; o MOHID, elaborado pelo Centro de Ambiente e Tecnologia Marinha em Lisboa; e o Delft-3D, desenvolvido pelo Instituto de Investigação Deltares, na Holanda.

A Universidade Federal do Rio Grande e o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, com o Porto marítimo do município, vêm realizando um papel importante para o crescimento do desenvolvimento portuário da região. Pesquisas de cunho científico sobre as ações tomadas no porto tem sido recorrentes em parceria com estas instituições de ensino.

Assim, a modelagem computacional tem ganhado espaço em aplicações práticas para o gerenciamento e monitoramento do Porto de Rio Grande e da região. Neste contexto, o presente trabalho aplica o modelo hidrodinâmico TELEMAC-3D, já utilizado em estudos anteriores, como os realizados por [SCHMITT, 2010; MARQUES ET AL., 2011; DA SILVA ET AL., 2019; MARTELO ET AL., 2019A; BITENCOURT ET AL., 2020; FERNANDES ET AL., 2021].

É importante destacar que a hidrodinâmica é um fator-chave na interação dos processos que

controlam a dinâmica dos corpos-d'água. Desta forma, foi avaliado o impacto das alterações antrópicas na desembocadura na hidrodinâmica, ligada às descargas e aos padrões regionais de vento da Lagoa dos Patos. A influência do vento no desenvolvimento da pluma costeira foi analisada através de três situações que são os cenários mais frequentes observados na área de estudo. Para essas simulações, são apresentados os resultados do vento, salinidade e campo de velocidade. Já a análise do sedimento em suspensão foi usada para derivar estatísticas importantes, observar a extensão da pluma e ressuspensão de material particulado em águas rasas [TAVORA ET AL., 2019].

Este trabalho foi dividido em 5 capítulos, neste capítulo é conduzida uma introdução desenvolvendo o conceito de pluma costeira e os cenários de estudo. A seção 1 introduz o desenvolvimento do presente trabalho. A seção 1.1 apresenta o estado da arte, abordando os processos de hidrodinâmica e a circulação presente no ambiente de estudo, as atribuições da estrutura da pluma costeira e estudos já realizados sobre estruturas costeiras, bem como seus impactos no ambiente costeiro.

A seção 1.2 e 1.3 apresenta as contribuições da pesquisa realizada e descreve o objetivo geral e específicos, enquanto a seção 1.4 descreve a área de estudo da pluma da Lagoa dos Patos. O capítulo 2 mostra o procedimento aplicado executado para a utilização do modelo TELEMAC-3D e a apresentação do modelo numérico. Além disso, as condições iniciais e de contorno utilizada e as malhas de elementos finitos na seção 2.1, enquanto na seção 2.2, foi discutido o módulo de sedimentos finos em suspensão, SEDI-3D; e nas seções 2.3 e 2.4 são abordadas a calibração, validação e detalhes sobre o estudo de caso.

Na sequência, os resultados são apresentados no capítulo 3, analisando-se os seguintes aspectos da pluma: formação, comportamento e destino da pluma (seção 3.1), também quanto a pluma de sedimento em suspensão (seção 3.2), além do comportamento e destino da pluma (seção 3.3). Por fim, a conclusão e as considerações finais sobre o trabalho localizam-se no capítulo 4, com a conclusão e sugestões para trabalhos futuros.

1.1 Contextualização

O estado da arte foi elaborado relacionando diversos estudos acerca da hidrodinâmica costeira e a dinâmica da pluma da Lagoa dos Patos, com variações espaciais e temporais. Deve-se ressaltar serem sistemas individuais, os quais podem exibir características marcantes e diferentes sob diversas condições de forçantes presentes no ambiente.

1.1.1 Estrutura da pluma costeira: formação, comportamento e destino

No oceano e na plataforma continental atuam forçantes externas que influenciam na zona costeira, delimitando a linha costeira e a profundidade onde as ondas que influenciam no fundo do oceano. Esses sistemas recebem águas e materiais transportados em suspensão pela descarga fluvial oriunda do continente. A arrebentação das ondas e a dissipação das correntes de maré, responsáveis por gerar grande parte do transporte líquido na zona costeira. Entretanto, a origem desses movimentos ocorre no oceano aberto, o transporte líquido gerado por essas correntes atua sobre o fluxo de sedimentos com a distribuição de organismos e a dispersão de poluentes e nutrientes [DA SILVA, 2020].

Os ecossistemas como, estuários, deltas, lagoa, lagunas, representam a transição entre os ambientes marinhos e fluviais. De forma que, como dito por da Silva [2020] a ação das ondas e marés se propaga para dentro do continente. Os processos marinhos se propagam nesses ambientes depende das características do regime de ondas e de maré, que se opõem à descarga dos rios. Esses processos são fundamentais para o gerenciamento costeiro, dado que estão relacionados ao desenvolvimento, evolução e mudanças costeiras, à qualidade da água e à previsibilidade do ambiente costeiro.

O transporte que ocorre nos oceanos possui fatores como: marés, ondas, correntes, gradientes térmicos e gradientes de salinidade. A direção das marés pode ser facilmente controladas conforme a enchente e vazante [KIRINUS ET AL., 2012]. Estas descargas costeiras flutuantes produzem plumas e correntes costeiras sobre a plataforma continental e particularmente nas áreas da plataforma interna, onde podem modificar drasticamente as condições hidrográficas [GARVINE, 2001].

A variação espaço-tempo das correntes na frequência submarina mostra que a tensão do

vento é um agente principal na transferência do momento para as águas da plataforma continental. Este comportamento associado à espessura da camada Ekman muito maior que a profundidade local, mostra o domínio da dinâmica barotrópica, gerando correntes na direção do vento, como resposta a sua ação [DIAS, 2011].

As escalas das diferentes dinâmicas e as respostas costeiras são geralmente classificadas em: microescala, mesoescala e macroescala, conforme a dimensão espacial; e em curto, médio e longo prazo, conforme a dimensão temporal. O escoamento, denominado macroescala, é o equivalente oceânico do clima na atmosfera e possui uma escala temporal de variabilidade com períodos da ordem dos meses e escalas espaciais de variabilidade da ordem das centenas de quilômetros. No outro extremo do espectro, identificam-se os fenômenos de microescala com escalas de tempo. Entre elas, há uma escala intermediária, denominada mesoescala onde ocorrem processos como a maré, as oscilações de inércia e os vórtices de mesoescala [MARTINS, 1989A] (Figura 1).

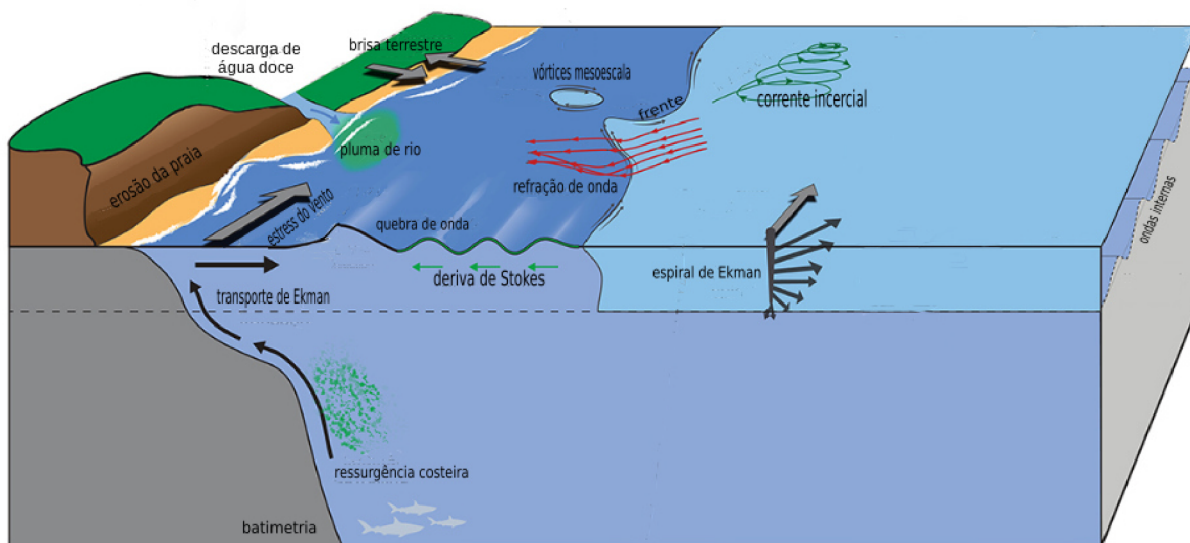


Figura 1: Representação esquemática dos processos do oceano que são acoplados através da interação entre ventos superficiais, correntes e ondas. Os processos impulsionados por essas interações variam de escalas regionais a globais e ocorrem em áreas costeiras (por exemplo, afloramento costeiro e brisa terrestre), mar aberto (por exemplo, correntes inércias e vórtices de mesoescala) e zonas marginais de gelo (por exemplo, deriva do gelo marinho). Também são ilustrados múltiplos componentes do sistema de observação, incluindo plataformas no seu lugar original (por exemplo, *drifters* de superfície, boias de ondas e amarrações) e de sensoriamento remoto (por exemplo, radar HF e satélites). Fonte: Adaptado de Bôas et al. [2019].

Os processos de interação oceano-atmosfera ocorrem através da troca de energia existente entre esses meios. Fenômenos oceanográficos localizados, como as ressurgências, por exemplo,

são naturalmente associados às massas d'água, ao regime de ventos e à geometria da costa, resultando em processos de transporte entre os sistemas que podem retroalimentar o processo. A escala temporal e o grau de interação podem variar de diário, sazonal e também escalas maiores [MENDONÇA, 2013].

1.1.2 Plumas de pequena escala

As plumas podem ser classificadas como fluviais e estuarinas. Sendo as fluviais provenientes de água doce, dos rios, e materiais drenados do continente, da descarga de rio sobre os efeitos de marés resultando em uma liberação direta de água doce continental em direção ao mar. Já as estuarinas, os efeitos das marés no estuário promovem a mistura da maior parte da água provinda da drenagem continental [MANN, 1991].

Quando a água da camada superior de um estuário ou rio flui para o oceano aberto, deixa para trás uma região estreita onde o fluxo é predominantemente bidimensional e entra no oceano, se introduzindo em um espaço que já existe uma forças particulares, como a força Coriolis, que pode mudar a direção do fluxo [PRITCHARD, 1952].

A água, no entanto, não consegue mudar de direção devido aos limites laterais do estuário, mas a água se move para a direita, causando uma leve inclinação na superfície do mar e um gradiente de pressão na direção oposta à força de Coriolis. A posição da pluma será o resultado das forças relativas do fluxo de fundo no oceano e do novo fluxo que entra pelo rio ou estuário [GARVINE, 1977].

Entretanto, a análise da pluma é difícil devido à sua variabilidade. No caso da força do vento, a pluma pode mudar tanto de posição que, em muitos pontos, a pluma pode ser apenas eventual [HETLAND AND SIGNELL, 2005]. As plumas de pequena escala são afetadas por mais forçantes, em função da sua menor descarga fluvial. A partir da desembocadura a estrutura de uma pluma costeira será controlada pela categoria de escoamento, o qual determinará a formação dos diferentes campos da pluma [MCCLIMANS, 1988].

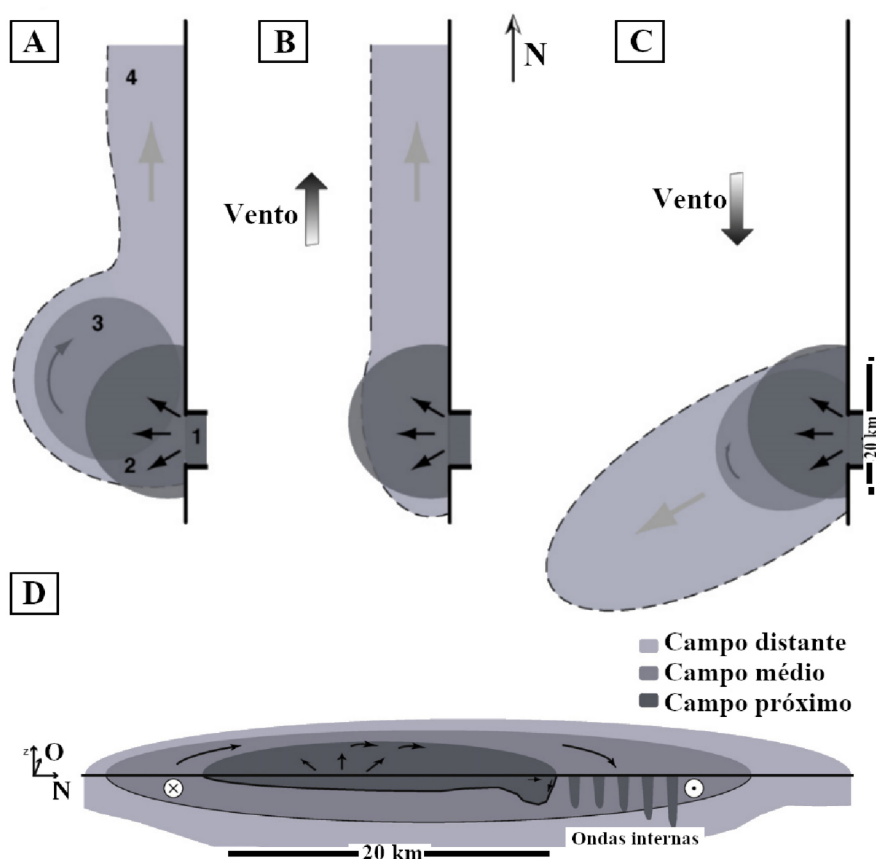


Figura 2: A pluma apresentada em A, a pluma campo próximo (1) — a expansão inicial da vazão para as primeiras 6 – 12 horas. Frentes de pluma de maré e ondas internas se comunicam com o resto da pluma. O campo médio (2) é uma protuberância em rotação com água de 2 – 4 dias. Campo distante (3) é o resto da descarga recente da pluma. A decolagem da pluma (4) ocorre nas frentes costeiras com fortes ondas internas. Os componentes da pluma (1), (2), (3) e (4) também fazem efetivamente parte do movimento da pluma do estuário que podem ser fortemente afetado pelos ventos locais. Fonte: Adaptado de Horner-Devine et al. [2009].

Ao estudar o sistema frontal da pluma, identificou alguns processos para caracterizar a dinâmica da expansão do fluxo do rio para o mar: (1) aceleração, resultante do equilíbrio entre as forças de inércia e gravidade (flutuabilidade); (2) mistura, governada pela turbulência devido ao fundo é atrito interfacial; e (3) geostrofia, onde o equilíbrio entre Coriolis e o gradiente de pressão *cross-shore* gera uma corrente costeira ao longo da costa. Onde é medido pelo raio de deformação e se propaga deixando a costa para a direita no hemisfério norte, ou à esquerda no hemisfério sul. Dessa forma, há três componentes *offshore* principais da pluma: as plumas campo próximo (de mares), campo médio (recirculante ou bojo) e de campo distante [HORNER-DEVINE ET AL., 2009] (Figura 2).

A excursão de uma pluma de pequena escala na zona costeira se desenrola com uma série

de processos, que se iniciam com a formação do seu campo próximo. Essa zona é caracterizada por um fluxo supercrítico, o qual causa um intenso espalhamento radial da pluma. Incluindo a ação das ondas e do atrito do vento, o campo próximo é a zona onde ocorre a maior parte do processo de mistura da pluma. Em seguida, ocorre a formação do campo médio, delimitado pela frente da pluma e marcado por uma estratificação restrita à camada superficial [HETLAND, 2005].

No campo próximo, onde ocorre a expansão inicial da pluma sendo delimitada por fortes descargas, contraste da salinidade com a água da plataforma e é prontamente mensurável conectado à sua fonte ribeirinha ou estuarina. O campo próximo das plumas é a zona onde ocorre o processo de sedimentação e decantação do material mais fino. Isso ocorre em função da desaceleração da velocidade da pluma, quando atinge regiões de maior profundidade da zona costeira [GARVINE, 1982].

A corrente costeira associada ao campo distante da pluma, por outro lado, consegue transportar frações mais grosseiras por uma distância maior. Dessa forma, o espalhamento no campo próximo da pluma é o que determina a capacidade da pluma de influenciar áreas mais distantes da plataforma interna [KOURAFALOU ET AL., 1996]. Já o campo distante, limita a influência da pluma numa área mais restrita à linha de costa. Em regiões com mais desembocaduras próximas entre si, as plumas podem se mesclar e intensificar as correntes costeiras, formando uma lente de água costeira de baixa salinidade capaz de se propagar por distâncias ainda maiores [WALKER ET AL., 2005].

O transporte da água do rio para longe da foz é impulsionado principalmente pela flutuação da pluma, estresse do vento e correntes costeiras ambientais e é fortemente mediado pela rotação da Terra. Os processos de mistura próximos à foz do rio ou no centro da pluma de campo próximo desempenham um papel importante no transporte da pluma porque os gradientes de pressão baroclínica, proporcionais aos gradientes de densidade interna, conduzem o transporte da pluma. Na ausência de forçantes externos significativos, o transporte para longe da foz do rio pode ser dominado pela retenção da água do rio em uma característica de redemoinho persistente conhecido como bojo [HORN-DEVINE ET AL., 2015].

No campo médio, o efeito do vento é mais relevante, conseguindo defletir a propagação da

pluma. Nessa zona, a água da pluma tende a recircular em um bojo antes de seu escoamento iniciar a formação de uma corrente costeira de baixa salinidade. O campo distante se forma a partir da corrente costeira, a qual é originada pelo escoamento da pluma. Como essa corrente se estabelece junto à linha de costa, o campo distante sofre uma influência adicional do atrito das ondas com o fundo. Naturalmente, a formação desses campos depende da intensidade da descarga fluvial, das condições de vento e da configuração da costa e de suas correntes [BLUMBERG, A. F. AND MELLOR, 1977]. Assim, existe uma variedade de plumas que podem apresentar apenas um ou dois dos campos citados.

Em seguida, teremos a “região de decolagem”, que ocorre de 3 a 7 km do oceano, segundo Horner-Devine et al. [2009], onde há um rápido rebaixamento da pluma, pode causar uma aceleração significativa. Pode também haver divergência horizontal de linhas de fluxo na pluma, impulsionada por gradientes de pressão laterais resultantes da diferença de densidade entre as águas da pluma e as águas do oceano ambiente, pode moderar a aceleração impulsionada pelo bojo. A presença de turbulência ativa não apenas produz uma força de arrasto nas águas da pluma, desacelerando diretamente o avanço da pluma, porém também pode desempenhar um papel na modificação da taxa de expansão da largura devido a uma influência direta no gradiente de pressão lateral.

A pluma recirculante consiste em água que ficou na plataforma entre 0.5 e 4 dias e corresponde à região do bojo observada em experimentos de laboratório e modelo numérico. Nesta região, a água da pluma é fortemente afetada pela rotação da Terra, bem como pelo momento da descarga do rio Wiseman and Garvine [1995], também já haviam chamado o campo de recirculação de campo intermediário, sendo a transição do campo próximo-distante; onde a dinâmica depende tanto do momento e da fluatuabilidade do jato, quanto do fluxo.

Conforme as características de cada região, é possível apresentar eventos oceânicos, ventos e ondas, que impactem no processo de dissipação da massa de água. Contribuindo para a mistura inicial das águas da pluma no campo próximo e no campo intermediário. A quebra de ondas, as interações onda-fundo (que geram um aumento da mistura turbulenta) e as instabilidades de cisalhamento no entrelaçamento da pluma são todos processos que contribuem para a dissipação da estratificação na pluma [WISEMAN AND GARVINE, 1995],.

A pluma de campo distante é normalmente diferenciada da água do oceano ambiente com base em uma salinidade alta. As escalas de tempo para retenção de fluido na pluma de campo distante dependem das condições externas, como vento e provavelmente estão na faixa de 2 a 10 dias. Ao longo do ciclo das marés, a mistura frontal ultrapassa o fluxo de fluidez e, eventualmente, dispersa a pluma. Em pluma de grande escala e frentes oceânicas, a propagação externa da frente é limitada pela rotação da Terra [GARVINE, 1987].

A escala dessas frentes é caracterizada pelo raio de Rossby baroclínico, e elas desenvolvem forte cisalhamento frente-paralelo. Além da mistura via cisalhamento de Ekman, o vento também pode traduzir uma pluma e aumentar e conduzir ao cisalhamento ou limitar o transporte. O vento costuma ser o condutor dominante do transporte em uma nuvem. Em geral, um vento emergente aumentará o transporte ao longo da costa, enquanto um vento ressurgente o diminuirá [GEYER ET AL., 2001].

Na Figura 3, apresentada a seguir, demonstra um esquema da mistura de uma parcela de água ao sair do rio/estuário e eventualmente se tornar parte das águas de fundo [HETLAND AND SIGNELL, 2005]. A ação dos ventos também influencia a estrutura de estratificação da pluma. Quando ventos favoráveis à ressurgência ocorrem, a mistura da pluma é favorecida e o seu espalhamento superficial aumenta. Já quando ventos favoráveis à subsidência ocorrem, o espalhamento da pluma é suprimido, formando um intenso gradiente horizontal ao largo da costa [PIMENTA AND KIRWAN, 2014].

Um vento ressurgente é um vento ao longo da costa na direção oposta à corrente costeira que cria um fluxo *offshore* divergente devido ao transporte Ekman; o vento descendente sopra na mesma direção da corrente costeira e cria um fluxo convergente em terra, no entanto, para uma pluma onde a picnoclina cruza um trecho significativo do fundo do mar. A mistura da pluma pelo vento depende principalmente do cisalhamento da camada superficial de Ekman, em uma plataforma não estratificada, a convergência ou divergência do transporte de Ekman na costa causará uma configuração, ou redução do nível do mar, que no que lhe concerne irá conduzir correntes geostróficas ao longo da costa na mesma direção que a tensão do vento ao longo da costa [HETLAND, 2005].

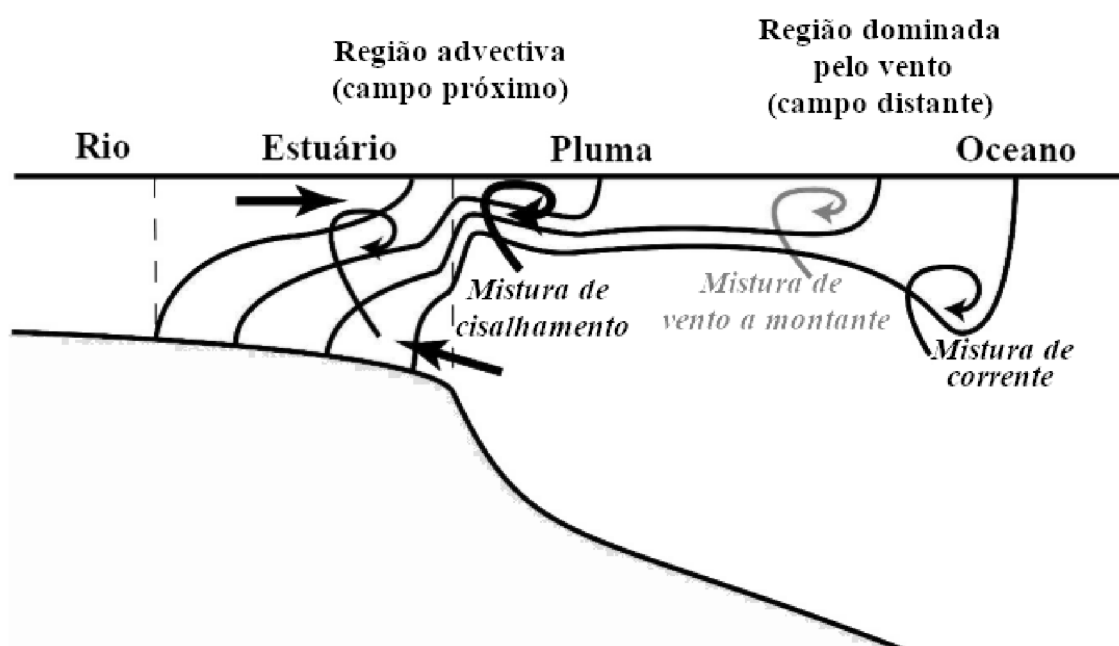


Figura 3: A anatomia da pluma do rio mostra as principais regiões e indica os mecanismos de mistura dominantes de uma pluma de rio. Adaptado de Hetland [2005].

Algumas classificações sobre a pluma da Lagoa dos Patos já foram predefinidas, por exemplo, por Marques et al. [2010c]; Monteiro et al. [2011]; da Silva [2020], com base em algumas classificações apresentadas por [HORNER-DEVINE ET AL., 2015; GEYER ET AL., 2001]. Que afirmam que para a Lagoa dos Patos, quanto ao fluxo na desembocadura de um estuário têm um número de Froude maior que 1 ($Fr > 1$), o fluxo é dito supercrítico e ocorre a formação do campo próximo da pluma, caracterizado pelo espalhamento radial, submetido à ação dos ventos e ondas como principais mecanismos de mistura.

Após esse estágio, se a força de Coriolis for relevante, ou seja, número de Kelvin menor que 1 ($K < 1$), ocorrerá a formação de um bojo de água de baixa salinidade capaz de circular por vários dias. Após recircular no bojo, a água pode se propagar ao longo da linha de costa, formando uma corrente costeira que se propaga no sentido das ondas de Kelvin, formando o campo distante da pluma, onde a mistura se deve principalmente à ação dos ventos, das ondas e da fricção com o fundo [GEYER ET AL., 2001]. Outro parâmetro para se avaliar a pluma verticalmente, seria através do transporte de Ekman (E), que contribui para o processo de advecção ao mar, como apresentado por [FONG ET AL., 1997]. A pluma diluída é suscetível a uma mistura significativa devido às correntes horizontais, e pode ser observada verticalmente.

1.1.3 As estruturas costeiras, controle de sedimentos e jatos turbulentos

O Brasil possui um alto nível de urbanização. Segundo a Organização das Nações Unidas (ONU), no ano de 2010 o Brasil tinha uma taxa de urbanização de 84,4% e, segundo projeções, até 2050 esta porcentagem deve ser superior a 90%. População esta, que se concentra principalmente nas zonas costeiras, pois seis em cada dez pessoas vivem dentro de um raio de 60 km da orla litorânea e dois terços das cidades do mundo, com população de 2,5 milhões de pessoas ou mais, localizam-se próximas dos estuários [IBGE, 2011; CNUMAD, 1992]. Além disso, o crescimento exponencial acelerado das populações nas costas, intensifica as mudanças globais, como o aumento do nível do mar e a frequência de eventos meteorológicos extremos [BULLERI AND CHAPMAN, 2010].

Estes são ambientes transicionais entre o continente e o oceano, sob influência de diferentes climas e regimes de marés, presentes nas regiões litorâneas do globo. Estuários podem ser definidos de diversas maneiras, baseando-se nas variáveis que estão sendo analisadas. Há mais de quarenta diferentes definições, entre elas definições físicas, geológicas, químicas, biológicas e ecológicas. Em termos hidrodinâmicos, Pritchard [1952] definiram um estuário como sendo um corpo de água costeiro semifechado com uma conexão livre com o mar aberto, dentro do qual a água do mar é mensuravelmente diluída com a água doce proveniente da drenagem continental. São habitats mais ocupados pelos seres humanos, causando alterações efetivas na paisagem costeira.

As modificações de engenharia nas entradas são geralmente usadas para melhorarem o processo de navegação e normalmente envolvem uma combinação de molhes e manutenção de um canal dragado. Embora os projetos de engenharia sejam direcionados para resolver problemas, também podem contribuir na criação de problemas em outros locais próximos como impactos ambientais ou efeitos colaterais. É melhor projetar de forma que os efeitos colaterais (aprisionamento de areia, déficit de areia, erosão *downdrift*) sejam mínimos [MASRIA ET AL., 2014].

Atualmente, a capacidade de movimentação de portos estuarinos é um fator crucial para o desenvolvimento econômico de algumas cidades. A crescente rede comercial global e o aumento contínuo dos navios comerciais estão avançando em direção a uma dragagem mais in-

tensa das vias navegáveis para os portos. O mercado global de dragagem aumentou quase três vezes nos últimos 10 anos, cerca de US\$ 15 bilhões, segundo a Associação Internacional de Empresas de Dragagem. As estruturas costeiras alteram processos físicos, químicos e biológicos de importantes habitats entre-marés. Tais impactos ocorrem de maneira difusa em escala local, regionais e globais significativas [PERKINS ET AL., 2015].

Alguns trabalhos trazem discussões sobre o impacto dessas obras para a hidrodinâmica e morfodinâmica, por exemplo, no estuário do Rio Oujiang, na China, foi estudada em [XING ET AL., 2013]. Os autores utilizaram simulações numéricas para comparar o processo hidrodinâmico e a distribuição de salinidade antes e depois das alterações no rio, realizado por um bloqueio no lado sul da foz do rio Oujiang. A intrusão de água salina se mostrou aceitável, embora haja mudanças significativas de salinidade acontecendo dentro ou fora do ramo sul, portanto, atenção suficiente deve ser dada às mudanças de ambiente causadas pela variação de salinidade após o projeto de bloqueio.

Em Aveiro, Dias [2011]; Dias et al. [2012] para manterem o funcionamento no porto de Aveiro e a exploração de sal no local. Em 1808, aconteceu a abertura artificial de nova barra no local, através da construção de dois molhes para permitir melhor acesso ao porto, proporcionando a recuperação econômica e social da região. A configuração atual da Ria de Aveiro é o resultado de uma evolução a longo prazo resultante de frequentes trabalhos de engenharia e da sua evolução natural. Em resumo, o prolongamento do molhe norte de 200 m na enseada da Ria de Aveiro alteram ligeiramente os padrões hidrodinâmicos locais, podendo induzir alterações na circulação geral da lagoa relacionadas com a diminuição do prisma de maré encontrada nos principais canais. Embora essas obras atendam aos principais objetivos de navegação e, tenham impacto significativo na economia local.

Os autores Cozzoli et al. [2018] estudaram os rios Oosterschelde e Westerschelde, de modo a investigar comunidades macrozoobênticas e as alterações humanas contrastantes do habitat hidro-morfológico: aprofundamento dos canais estuarinos para melhorar a navegabilidade de Westerschelde *versus* realização de uma barreira contra tempestades para melhorar a segurança costeira de Oosterschelde. O rio, a longo prazo, apresentou parâmetros distintos com relação a bentônicos nas águas calmas de Oosterschelde e maior salinidade nas águas de Westerschelde.

As medições do escoamento das marés e da produção do modelo mostram uma tendência persistente para o transporte de sedimentos em direção e fora da entrada de Oosterschelde. A construção das barragens de barreira traseira apenas amplificou essa exportação, aumentando o prisma das marés e empurrando a bacia fora de equilíbrio ainda mais do que aparentemente já estava.

Também temos que considerar as questões físicas das estruturas costeiras. As interações em estruturas tipo, molhes e quebra mares, a troca de água através das entradas em cada ciclo das marés é cerca de um terço do volume total da lagoa e as forçantes circulação são a maré e o vento. A estratificação das massas de água é vista apenas a alguma distância das entradas, onde a energia da maré é baixa. Nas entradas, as velocidades da água são altas e o cisalhamento vertical cria turbulência suficiente para misturar a coluna de água. Consequentemente, as trocas de água entre a lagoa e o mar são essencialmente barotrópicas. Estas mudanças provavelmente modificarão as interações entre a lagoa e o mar, a hidrodinâmica local ao redor do rio ou lagoa. No trabalho realizado por Ghezzi et al. [2010], o autor realiza modelagem de estruturas a serem implantadas na lagoa de Venice, Itália. Entre os resultados de hidrodinâmica, a formação de novos vórtices e transporte turbulento próximo às estruturas são uma característica resultante da inserção de estruturas nas costas.

Os autores Ball et al. [2012], estudarem o escoamento de jatos turbulentos em campos livres, apresenta semelhança com o comportamento das estruturas costeiras. Sendo os modos de instabilidade inicial, criados pelo jato em sua fonte, produzem as estruturas de escoamento na camada de cisalhamento (ou zona de mistura); os vórtices resultantes se enrolarão e depois se emparelharão (ver Figura 4). A intensidade do emparelhamento de vórtices depende das condições iniciais (sendo muito mais fraco ou inexistente em jatos de tubos, por exemplo). O perfil de velocidade média na saída é determinado por sua geometria; um bico, tubulação ou orifício de arestas vivas produzirá um perfil de escoamento convergente, do tipo chapéu de topo, de força ou complexo, respectivamente. Historicamente, como discutido posteriormente, acreditou-se que as características de escoamento criadas por estes perfis eram eliminadas à medida que o escoamento evoluía para jusante até o campo distante.

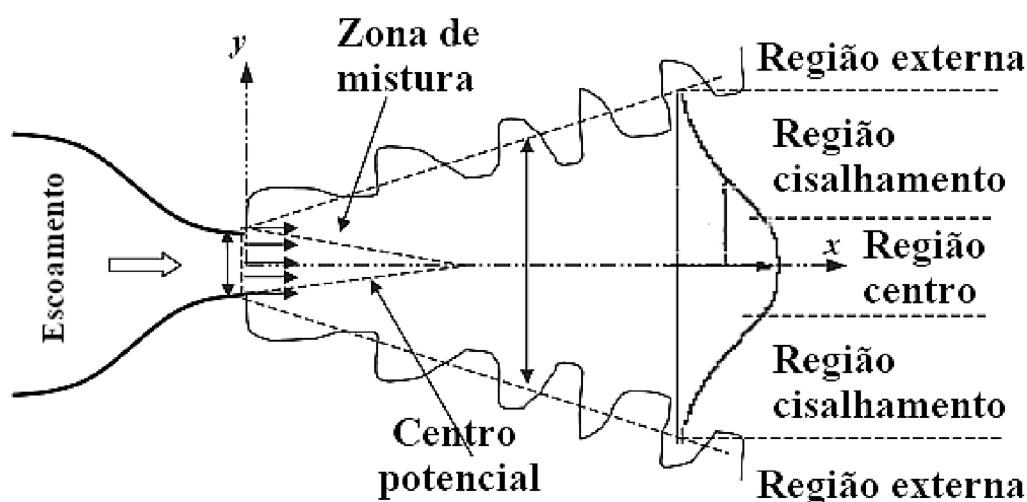


Figura 4: Esquema de um jato livre e seu sistema de coordenadas. Adaptado de Ball et al. [2012].

Outra contribuição importante para complementar o comportamento dos jatos, é a relação transporte/tempo que os autores Marques et al. [2010b] conduz, ao analisar diferentes períodos de descarga na Lagoa dos Patos, seu comportamento e destino da pluma. Este resultado sugere que, no campo distante, o avanço e deformação são representantes para explicar os processos de estratificação/mistura, somada a dispersão e o avanço vertical, a pluma se dispersa no oceano. Estes termos podem ser importantes no campo próximo. Os termos de estratificação e advecção parecem ser as contribuições mais importantes para as potenciais anomalias energéticas de poucos dias para as escalas de tempo mensais.

A deformação transversal é importante na região próxima ao campo, sugerindo que os desvios da profundidade média da costa influenciam consideravelmente a dinâmica desta região. A deformação *longshore* que ocorre ao longo de todo o corpo da pluma é indicativa das regiões com altos desvios de profundidade média *longshore* componente da velocidade. O avanço devido à velocidade média horizontal vertical parece ser importante nos campos próximos e distantes, e o transporte dominante está na direção sudoeste, com dispersão moderada à medida que a pluma se desloca para o mar [MARQUES ET AL., 2010B].

1.2 Contribuições para o estado da arte

A atenção governamental para com o uso sustentável dos recursos costeiros e marinhos está contemplada nos mecanismos de gestão ambiental integrado estabelecidos no âmbito do Plano

Nacional de Gerenciamento Costeiro - Lei 7.661, 1988. O que significa, antes de qualquer coisa, a preocupação com o ordenamento da ocupação dos espaços litorâneos. Nesse sentido, tudo isso se aplica a importância dos ecossistemas de banhados e lagoas costeiras para a biodiversidade do planeta, que tem sido repetidamente reconhecida por pesquisadores e órgãos nacionais e internacionais que as chamam áreas vitais. [BRASIL, 2015].

Neste sentido, nosso país está comprometido com a preservação dos ambientes lagunares costeiros, mas isso muitas vezes não se verifica na prática. Devido à disponibilidade de água doce, abrigo e fácil acesso ao mar, as lagoas costeiras costumam ser cercadas por cidades de grande porte, havendo a ocupação urbana de seus arredores, aumentado nos últimos anos, o que as coloca em séria situação de risco. Banhados são sistematicamente aterrados para a expansão imobiliária, sem hipótese de recuperação. Assim, a sua preservação se justifica por razão de sua fragilidade intrínseca, sua relevância ecológica, funcional e a existência de fenômenos biológicos excepcionais. Por estas razões, a restinga de Rio Grande foi definida como área prioritária de extrema importância para a conservação da biodiversidade costeira e marinha [BRASIL, 2015].

A evolução das relações entre a cidade e para o porto, um conjunto de alterações pode ser visto, como a reorganização dos ambientes e o surgimento de mercados específicos [MONIÉ AND VIDAL, 2006]. O desenvolvimento humano, com ocupação dos espaços físicos da zona costeira, adiciona um forte impacto que afeta a qualidade da água, a produtividade biogênica e as taxas de acumulações de sedimentos [CONCEIÇÃO AND DOMINGUES, 2014].

Os portos podem gerar impactos com pontos negativos, bem como positivos sobre o ambiente onde eles estão localizados. Os impactos negativos são aqueles que prejudicam o meio ambiente, como, por exemplo, as alterações na circulação de água e o ecossistema marinho, problemas causados pelo efeito de dragagem e disposição de resíduos. Os impactos positivos são percebidos por desenvolvimento econômico local, regional e nacional, a geração de novos empregos, o investimento das indústrias em locais de habitação, a um aumento na mão de obra especializada, e a instalação de novas empresas [LOURENÇO AND ASMUS, 2014].

Em 2013, a nova Lei dos Portos - Lei n.º 12.815, alguns elementos ambientais foram originalmente contemplados no gerenciamento dos portos: a emissão de um termo de referên-

cia para os estudos ambientais visando a porta premissa; monitoramento ambiental como um dos programas Nacional de Drenagem de atividades; competência da administração do porto, observando a execução de atividades relacionadas ao meio ambiente. Todas essas são ações inovadoras, visando a porta de gerenciamento ambiental [LOURENÇO AND ASMUS, 2014].

A região da Lagoa dos Patos possui histórico de elevadas taxas de sedimentação nos últimos 150 anos [CONCEIÇÃO AND DOMINGUES, 2014]. A Universidade Federal do Rio Grande (FURG), o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS), com o Porto marítimo do município, vêm difundindo um papel importante para o crescimento do desenvolvimento portuário da região. Pesquisas de cunho científico sobre as ações tomadas no porto tem sido recorrentes em parceria com estas instituições de ensino. Assim, a modelagem computacional tem ganhado espaço em aplicações práticas para o gerenciamento e monitoramento do Porto de Rio Grande e da região.

Visto isto, a pesquisa pode contribuir para o estado da arte, acrescentando informações sobre os Molhes da Barra de Rio grande e sobre tudo sobre a pluma da Lagoa dos Patos junto a plataforma. Complementares aos trabalhos já realizados na Instituição como os de Marques et al. [2006, 2009, 2010c]; Monteiro et al. [2011]; Silva et al. [2015]; da Silva [2018]; da Silva et al. [2019]; Martelo [2019]; Martelo et al. [2019a]; António et al. [2020]; Fernandes et al. [2021]. As informações também são importantes para o gerenciamento da Superintendência do Porto de Rio Grande (SUPRG), já que o canal projetado pelos Molhes da Barra, passa por manutenções constantes com o processo de dragagem. Além da observação da linha de costa nas praias do Cassino em Rio Grande e a praia da Barra da Quinta, em São José do Norte.

Sendo importantes para manutenção das informações para a rede de drenagem de sudeste, impactos ambientais, como: dragagem Portuária, que a cada 2 anos se realiza necessário à retirada de cerca de 3 milhões de m³ de sedimentos do canal de acesso ao porto, a um custo orçado em R\$ 12,4 milhões para manutenção do calado de 12 m [MARTELO, 2019]; depósitos de Lama na Praia do Cassino [MARTINS ET AL., 1989; CALLIARI ET AL., 2010], representam um fenômeno de deposição de lama em uma praia oceânica exposta, onde incidem ondas com energia moderada a elevada. Os eventos são aperiódicos, e para aquele registrado em janeiro de 1998 foram necessários à movimentação de 10.000 caçambas para remoção dos depósitos de

lama da praia do Cassino [CONCEIÇÃO AND DOMINGUES, 2014].

As taxas de sedimentação de curto período são em média dez vezes maiores que às de longo período. As taxas de sedimentação comparadas com aquelas das variações relativas do nível relativo do mar regional, com valores entre +0.7 e +1.3 mm/ano, indicam que a laguna apresenta uma tendência de inversão entre o déficit acrecional de longo período, para um *supervit* acrecional de curto período (Toldo et al., 1999), ou seja, o atual processo de assoreamento do piso lagunar é mais rápido que a subida relativa do nível do mar regional [TOLDO JR, 1991].

Outro fator, apesar de não calculado, mas que também pode servir de base para próximos trabalhos, como a corrosão. Estruturas portuárias são geralmente divisores de atmosférica, água, energia das marés, a água do mar, e de lama e de aterramento de zonas. O material mais comum usado em porta de estruturas de aço e de concreto armado. Os danos corrosivos de estruturas em portos são inevitáveis, e, em casos extremos, fechamento de áreas da porta pode causar graves sanções financeiras enquanto espera para reparos sejam realizados. Ele segue, portanto, que, para evitar o inesperado em grande escala as medidas de reabilitação, como consequência da negligência de manutenção periódica, sistemática de planejamento e orçamento das atividades de manutenção são necessárias. A gestão do ciclo de vida e toda a sua vida de cálculo de custos, irá contribuir para uma abordagem realista da política de manutenção, incluindo a tomada de decisão, de planejamento, orçamentação e financiamento de inspeção e de reparação de atividades durante o tempo de vida das estruturas do porto [ZEN, 2005].

Existem quatro fases no ciclo de vida: planejamento e projeto; elemento de fabricação e construção; operação e remoção. O papel da gestão da manutenção é investigar uma planejado regime de inspeção, de curto e médio prazo, de reparação e de substituição de programação, o orçamento para os reparos de até 5 anos à frente, um banco de dados de informações sobre a durabilidade de desempenho, planejamento de longo prazo para o abandono ou a reconstruir, etc [ZEN, 2005].

Os resultados das simulações dos cenários, com a configuração dos molhes anterior ao ano de 2011 e posterior a reforma dos mesmos. Apresentando comparações e diferenças entre a movimentação da pluma mediante o direcionamento do escoamento a reforma dos molhes. Sobre o

comportamento de correntes, salinidade superficial, elevação da superfície livre, sedimento em suspensão e o fluxo de sedimento em suspensão. Além, de proporcionar material para futuras modelagens numéricas a serem desenvolvidas na FURG e no IFRGS.

1.3 Objetivo geral

Avaliar através da modelagem computacional a contribuição ou como a nova configuração afeta a pluma costeira dos molhes da Barra de Rio Grande para a formação, comportamento e destino da pluma costeira da Lagoa dos Patos.

1.3.1 Objetivos específicos

- Identificar a assimetria entre os dois cenários estudados, diferença nas estruturas costeira, causa no padrão da pluma da Lagoa dos Patos. Analisando a partir dos períodos de baixa e alta descarga;
- Contribuição da pluma de sedimento em suspensão que acontece em diferentes escalas, na desembocadura da Lagoa dos Patos e na plataforma continental;
- Avaliar as diferenças dos processos dominantes entre os cenários, frente a diferentes descargas.

1.4 Lagoa dos Patos e a plataforma continental sul do Brasil

A área de estudo está localizada em 32°, 34.9° ao sul, 48° e 54° a oeste, abrangendo a Lagoa dos Patos e a plataforma continental do sul do Brasil. A plataforma continental do sul do Brasil tem uma extensão de 180 km ao sul, no *Arroyo Chuy*, indo cerca de 100 km ao norte, no Cabo de Santa Marta. A plataforma interna, engloba uma mistura de diferentes águas, oriundas da plataforma e da vazão de água doce.

As descargas do rio *La Plata* e da Lagoa de Patos são determinantes para a plataforma continental [CIOTTI ET AL., 1995]. Nesta região mais distante da desembocadura, os processos de mistura dependem da prévia advecção das águas de origem continental e são principalmente controlados pela ação direta da circulação costeira ao longo da costa e pelo transporte de Ekman

induzido pela ação remota do vento [MARQUES ET AL., 2010B]. A plataforma pertence ao Oceano Atlântico Sul que possui variabilidades que afetam o clima global e regional, resultantes da sua localização geográfica interligada pelo Oceano Índico e Oceano Atlântico Norte, onde atua com importante ação de circulação termohalina [SCHMITZ JR, 1995]. A modificação de troca de massas de água deste oceano o tornam o único oceano do mundo onde há um transporte líquido meridional de calor em direção ao Equador a partir do Polo Sul [HOSKINS AND HODGES, 2005].

Apesar de a lagoa estar situada em uma região temperada, com intensa precipitação nos meses de outono e inverno, a vazão total ainda é 15 vezes menor em volume que a vazão do rio *La Plata* [DE MIRANDA AND DE CASTRO FILHO, 1979], apresentando sua vazão máxima durante o inverno e no início da primavera [TÁVORA ET AL., 2020]. O *deficit* hídrico no verão e outono facilita a introdução da água salina ao norte na lagoa, o corpo central da lagoa se torna oligohalina, com gradientes de salinidade que alcançam cerca de 150 km [ABREU ET AL., 2010].

A Região Sul também é sensível a fenômenos climáticos que possuem passagem de sistemas frontais que se deslocam do Pacífico, passam pela Argentina e seguem para nordeste do país. Os sistemas que se desenvolvem no Sul e sudeste do Brasil são associados a vórtices ciclônicos ou cavados em altos níveis que chegam à costa oeste da América do Sul, vindos do Pacífico. Outro ponto nos sistemas possui uma intensa convecção associada à instabilidade causada pelo jato subtropical com propagação para leste sobre o Oceano Atlântico. Estes são sistemas resultantes de frontogênese ou ciclogênese [DE PESQUISAS, 1996].

Os valores mais altos de descarga na região estão relacionados aos períodos de *Oscilação Sul El Niño* (ENSO), enquanto os períodos de seca coincidem com os eventos de *La Niña* (LNSO). O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), ao calcular anos de ocorrência do fenômeno, considera período entre agosto de um ano até julho do ano seguinte.

Nos trabalhos de Marques et al. [2010b,a] há observações sobre os ventos do sudeste e sudoeste, que dão fortes contribuições para o deslocamento da pluma para nordeste, quebrando a estratificação vertical da plataforma continental interna. Nesta região, os ventos do nordeste induzem a formação de correntes no sudoeste perto da costa. Estas correntes defletem em torno

de molhes e geram zonas de recirculação para o sul. A formação de um vórtice ciclônico ocorre nesta área e cria zonas de convergência que intensificam as velocidades verticais promovendo a deposição de sedimentos em suspensão.

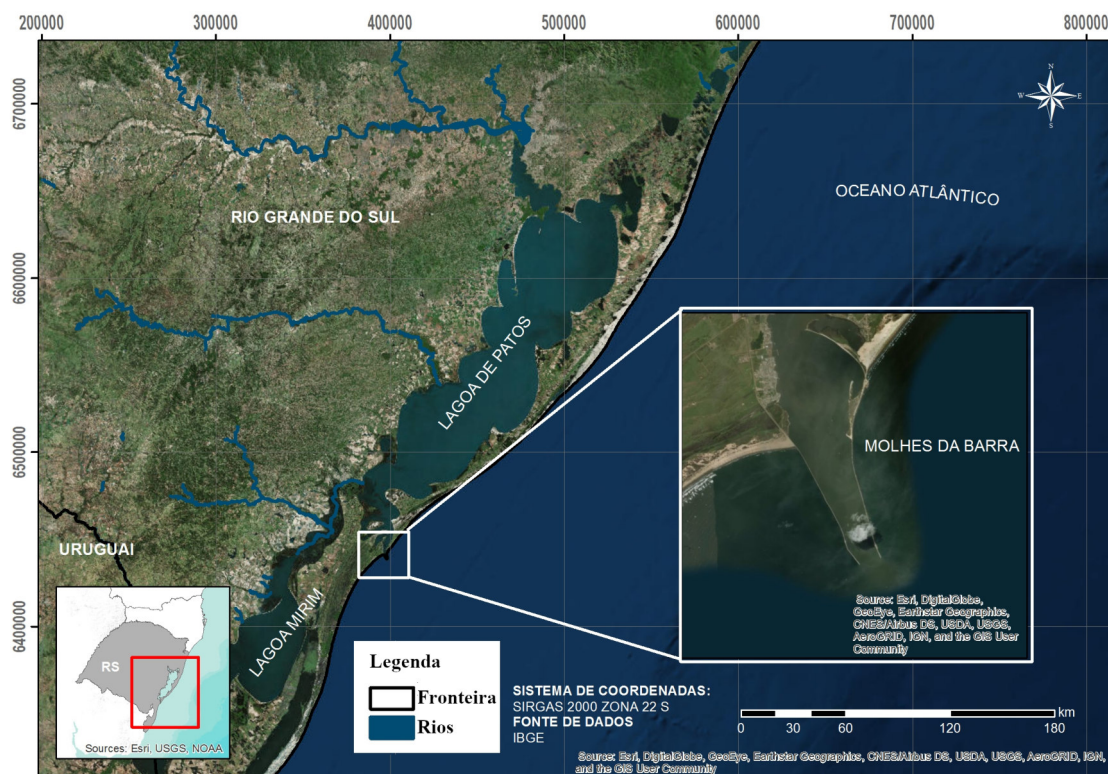


Figura 5: Localização da área de estudo, no município de Rio Grande, ao sul do estado do Rio Grande do Sul, apresentando em uma escala menor também na estrutura *nearshore*, os Molhes da Barra. Fonte: Autor, ArcGis 2018 — Esri, 2019.

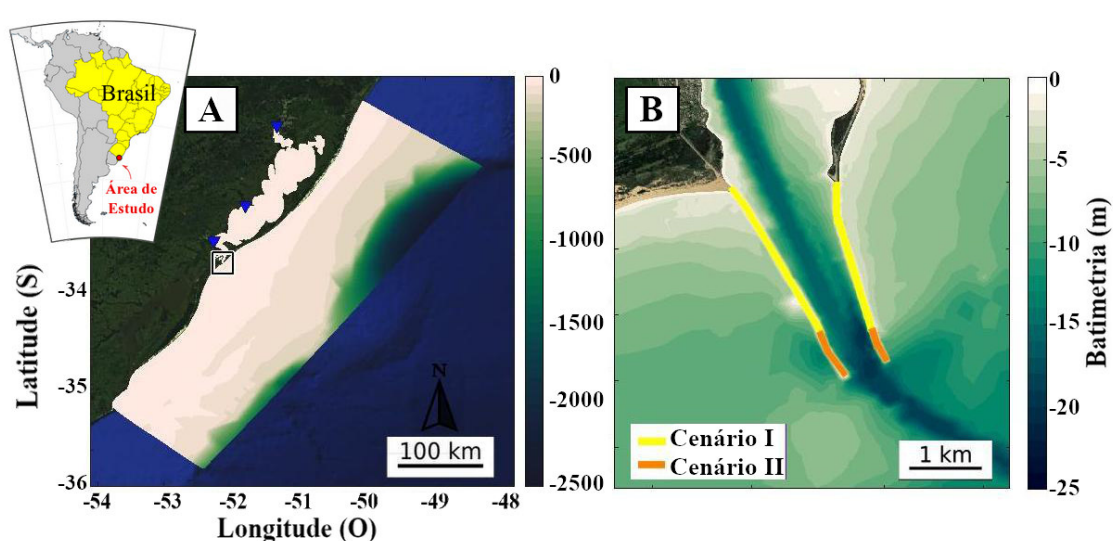


Figura 6: Apresentação da área de estudos com a batimetria do local na escala de 100 km (A) e na escala de 1 km (B), apresentando os dois cenários propostos para estudo, molhes antigos (Cenário I) e molhes novos (Cenário II). Fonte: Autor, Matlab 2018a — MathWorks Inc, 2021.

A Lagoa possui uma superfície de 10.300 km², com cerca de 250 km em sua extensão mais longa e 60 km em sua maior largura. Embora a profundidade média varie entre 6 e 8 m, nos canais de navegação naturais ou artificiais, ela aumenta para 10 – 20 m [CAVALLI ET AL., 2008; DE OLIVEIRA, 2014]. A região estuarina apresenta uma área de cerca de 900 km² correspondendo, cerca de 10% da área total (Figura 5 e 6).

Os molhes da Barra, no que lhe concerne, são estruturas desenvolvidas para regiões de águas rasas ou intermediárias (do inglês *nearshore*) e também pode ser categorizada como *jetty*. Onde Nordstrom [2014], define como estrutura relativamente curta, que se estende em ângulo do eixo principal do(s) molhe(s), para proteger o canal de navegação. Em alguns casos, as principais funções são redirecionar os sedimentos que podem entrar no canal de volta à praia, deste modo nutrindo a praia [SEABERGH, 2006].

Ainda assim o deslocamento dos sedimentos não é total, e conseqüentemente requerendo manutenções periódicas no canal, isto é, as dragagens [SILVA ET AL., 2015; MARTELO, 2019]. A via de navegação do Porto de Rio Grande, direcionada pelos molhes, impulsionam jatos de pressão de descarga para o oceano Atlântico. Como o ambiente de estudo passou por alterações nos últimos 10 anos, cabe observar a formação, comportamento e destino da pluma da região, e serão abordados nesse estudo por meio da modelagem computacional nos cenários propostos.

As bacias dos rios de descarga da Lagoa possuem uma intensa atividade de uso e ocupação do solo que influenciam na composição dos resíduos presentes na água. As sub-bacias Lagoa Mirim e Canal São Gonçalo, e Guaíba destacam-se pelo alto índice populacional (10.494.399 habitantes), o correspondente a 25% da população do estado, resultando em uma intensa poluição urbana, principalmente em épocas de veraneio, além de intensas atividades agrícolas, industriais e navais [SEMA, 2010; IBGE, 2011; SUPERINTENDÊNCIA DO PORTO DE RIO GRANDE, 2017]. Estas características podem ser alteradas por mudanças consideráveis na região [JIA ET AL., 1999].

Na Laguna é possível encontrar variadas proporções de misturas texturais entre os dois domínios, laguna e oceano. As altas taxas de material em suspensão refletem, ao norte, predominante influência fluvial e, ao sul, próximo ao único canal de ligação com o mar, a predominância

das condições estuarinas [MARTINS, 1989B]. A zona em que se concentra a pluma, chamada zona de frente por Marques and Moller [2016], é marcada pela formação de linhas de espuma ou detritos, onde possui também fortes gradientes de cor entre as diferentes massas de água. Esta é uma importante zona para a determinação de parâmetros de índices ambientais locais, bem como para a economia.

O porto de Rio Grande, no Rio Grande do Sul, possui uma colaboração significativa para o PIB do estado. De acordo com informações da Secretaria dos Transportes do Estado do Rio Grande do Sul, o porto apresenta forte participação do modal rodoviário, o que corresponde por cerca de 70% do volume transportado nos sentidos de exportação e importação [SUPERINTENDÊNCIA DO PORTO DE RIO GRANDE, 2017]. De modo a incentivar as transações portuárias, a Lei de Modernização dos Portos (Lei 8.630/1993) proporcionou investimentos ao Porto para tentar amenizar o assoreamento, e ampliar os estudos dos Molhes da Barra, concluídos desde 2011, consequentemente gerando melhor acesso e manutenção do canal, assistido constante por dragagens [AGUIAR, 2015].

2 MODELO NUMÉRICO: TELEMAC-3D

A escolha do modelo hidrodinâmico TELEMAC-3D, utilizado para este estudo de caso da pluma da Lagoa dos Patos, se deve ao fato de já ter sido calibrado e validado em trabalhos anteriores na região, por autores como Marques et al. [2010b]; Schmitt [2010]; Marques et al. [2011]; Kirinus [2017]; da Silva et al. [2019]; Martelo [2019]; Fernandes et al. [2021]. O modelo numérico hidrodinâmico TELEMAC-3D, pertence ao sistema *Open TELEMAC-MASCARET*². O uso de observações *in situ* para gerenciamento hidrológico e costeiro possuem alto custo, dificultando a cobertura de grandes áreas em um pequeno intervalo de tempo. Os modelos numéricos permitem a investigação em maiores escalas de espaço e de tempo, com o detalhamento necessário integrado [MARTINS ET AL., 1989].

O modelo TELEMAC-3D versão 7.0 foi também acoplado ao módulo de sedimentos em suspensão SEDI-3D. O modelo TELEMAC-3D resolve as equações tridimensionais de Navier-Stokes, considerando as aproximações Boussinesq e hidrostáticas. O modelo aplica a técnica de elementos finitos para resolver as equações hidrodinâmicas usando o sistema de coordenadas sigma na discretização vertical, para acompanhar os limites superficiais e de fundo [PHAM ET AL., 2013].

O processo de utilização dos dados e métodos seguidos, estão descritos na Figura 7, como descrito, a entrada de dados externos, organizadas com o *software* Matlab. A construção das malhas de elementos finitos e triangulares foi desenvolvida no *software* Blue Kenue. As simulações foram executadas nos computadores do Laboratório de Oceanografia Costeira e Estuarina - LOCOSTE/FURG.

O método de elementos finitos permite o controle da distribuição de elementos na grade computacional utilizada, permitindo estabelecer alta resolução em áreas de morfologia costeira e topografia de fundo complexa. O TELEMAC-3D resolve as equações tridimensionais do fluxo de superfície livre (com ou sem a hipótese da pressão hidrostática), e de transporte-difusão de quantidades intrínsecas. A prescrição dos traçadores no contorno é aplicada utilizando imposi-

²www.opentelemac.org — Um conjunto de *softwares* de elementos finitos de propriedade do Laboratório Nacional de Hidráulica e Meio Ambiente, parte do grupo de Pesquisa e Desenvolvimento da Electricité de France.

ções pela condição de contorno de Dirichlet³.

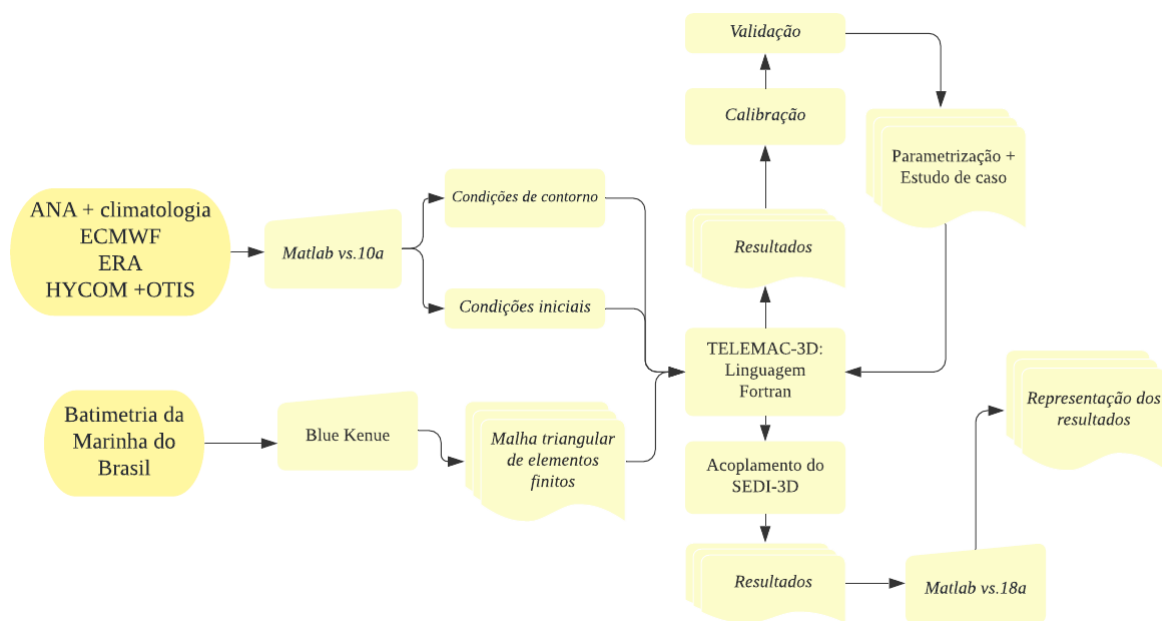


Figura 7: Fluxograma apresentando a sequência de processos das simulações feitas com o TELEMAC-3D e SEDI-3D.

São incluídos diferentes termos de força, como o termo Coriolis, os gradientes de superfície livre e densidade. Após as etapas de advecção e difusão, o tratamento do conjunto de equações para resolver baseia-se no fato de que a aproximação hidrostática é equivalente ao tempo longo (associada a ondas de águas rasas) [MARQUES ET AL., 2010C]. As equações hidrostáticas e tridimensionais de Navier-Stokes descrevem a dinâmica dos fluidos geofísicos em uma superfície livre. Aplicados ao movimento hidrodinâmico e suposição de pressão hidrostática e leis de conservação de massa. Podendo calcular ainda efeitos de densidade vertical resultante de temperatura e/ou salinização. Completamente aplicado para simulações de regiões salgadas e/ou com turbidez máxima, como num estuário, pode ser resolvido com o TELEMAC-3D [PHAM ET AL., 2013].

A aproximação de Boussinesq para a densidade também é aplicada, onde as variações de densidade não são consideradas junto ao termo gravidade. O modelo considera a evolução da superfície livre em função do tempo e utiliza equações de advecção e difusão para o transporte

³A condição de contorno de Dirichlet, creditada ao matemático alemão Dirichlet, é também conhecida como condições de contorno do primeiro tipo. Isso é aplicada sobre uma equação diferencial ordinária ou parcial, especifica os valores que uma solução necessita tomar no contorno do domínio [PHAM ET AL., 2013]

de concentrações de traçadores (salinidade, temperatura ou sedimentos em suspensão). Além de considerar as variações locais na superfície livre da água, em um campo tridimensional que descreve o domínio de velocidades (x,y) . As equações de conservação de massa (Equação 1), equações de conservação da quantidade de movimento (Equações 2, 3, 4 e de pressão 5), conseguem calcular a velocidade do fluxo nas direções x , y e z (u , v e w) e a elevação da superfície livre (η) ou outro intervalo de tempo [PHAM ET AL., 2013].

Equação de conservação de massa:

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Equações de conservação da quantidade de movimento:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} = -g \frac{\partial Z_s}{\partial x} + \nu \Delta(U) + F_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} = -g \frac{\partial Z_s}{\partial y} + \nu \Delta(V) + F_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} = -g \frac{\partial Z_s}{\partial z} + \nu \Delta(W) + F_z \quad (4)$$

Equação da pressão aplicada no modelo:

$$p = p_{atm} + \rho_0 g (Z_s - z) + \rho_0 g + \int_z^{Z_s} \frac{\Delta \rho}{\rho_0} dz \quad (5)$$

O traçador pode ser ativo (ver Equações 6 e 7), afetando na hidrodinâmica, ou passivo no TELEMAC-3D. Considerando temperatura, salinidade e, em alguns casos, um sedimento são traçadores ativos. A equação da evolução do traçador é dada como:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U \frac{\partial T}{\partial x} + V \frac{\partial T}{\partial y} + W \frac{\partial T}{\partial z} = -g \frac{\partial Z_s}{\partial z} + g + \nu \Delta(T) + Q \quad (6)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U \frac{\partial T}{\partial x} + V \frac{\partial T}{\partial y} + W \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_T \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_T \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \quad (7)$$

onde $h(m)$ é altura da coluna d'água; (m/s) a elevação de superfície livre; $U, V, W (m/s)$ as componentes tridimensionais de velocidade; $T (°C, g/L)$ o traçador passivo ou ativo (agindo na densidade); $p(x)$ a pressão (Pa); $p_{atm}(x)$ (Pa) a pressão atmosférica; $g (m/s^2)$ a aceleração da gravidade; $v (m/s)$ velocidade e coeficientes de difusão do traçador; $Z_f (m)$ a profundidade do fundo; $\rho_{0(x)}$ a densidade de referência; $\Delta \rho(x)$ a variação da densidade; $t(s)$ o tempo; $x, y (m)$ as componentes do espaço horizontal; $z (m)$ a componente de espaço vertical; $F_x, F_y (m/s^2)$ os termos de fonte nas direções x e y ; (s.u.) T rastreador passivo ou afetando a densidade; $v_\tau (m^2/s)$ coeficientes de difusão do rastreador; $t(s)$ tempo; $x, y, z (m)$ componentes espaciais; Q (s.u.) a fonte do traçador ou dissipador do rastreador.

As variáveis F_x e F_y são termos fonte denotando o vento, a força de Coriolis e a fricção do fundo (ou qualquer outro processo sendo modelado por fórmulas semelhantes), assim, vários traçadores podem ser considerados simultaneamente. Eles podem ser de dois tipos diferentes, seja ativo, ou seja, influenciando o fluxo, alterando a densidade, ou passivo, sem qualquer efeito na densidade e, no fluxo [MARQUES ET AL., 2010C]. O algoritmo básico do TELEMAC-3D pode ser dividido em três etapas computacionais, com três estágios. O primeiro passo consiste em descobrir os componentes de velocidade previstos, resolvendo apenas os termos de advecção nas equações de momento. O segundo passo calcula, a partir das velocidades advindas, os novos componentes de velocidade, considerando os termos de difusão e de fonte nas equações de momento. Essas duas soluções permitem obter um campo de velocidade intermediário.

2.1 Condições iniciais e de contorno do módulo hidrodinâmico

Campos iniciais de salinidade (Figura 8) e temperatura foram prescritos em todo domínio tridimensional com base nos resultados do Projeto HYCOM + NCODA Global (*HYbrid Coordinate Ocean Model*, ⁴), que apresentam resolução temporal de 1 dia e resolução espacial de $0,083^\circ \times 0,083^\circ$. As concentrações iniciais de sedimento em suspensão foram consideradas nulas. As malhas computacionais possuem contornos abertos, que podem ser divididos em contornos continentais, oceânicos e superficiais, onde são prescritas as diferentes condições de contorno para a realização das simulações. Os demais contornos são considerados contornos

⁴<https://hycom.org/>

fechados.

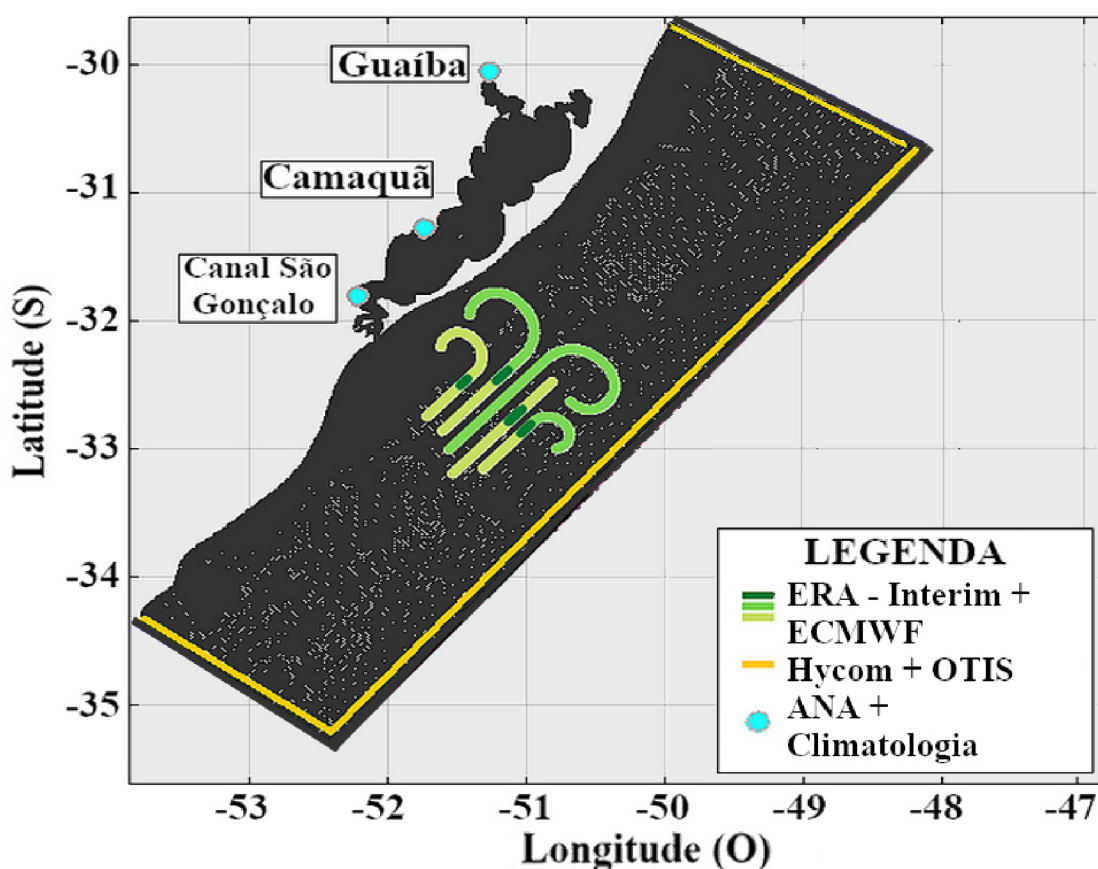


Figura 8: Localização das fronteiras abertas nas malhas e as condições de contorno inseridas no modelo: vento, salinidade, corrente, maré, descarga e a concentração de material em suspensão.

2.1.1 Fronteiras oceânicas

Para a prescrição de nível da superfície do mar nas fronteiras oceânicas, utilizou-se o OSU *Tidal Inversion System* (OTIS⁵), citados pelos trabalhos de Zu et al. [2008]; Dawson and Riedlinger [2009], fornecendo a elevação da superfície e a velocidade de corrente de maré regional. O nível do mar é calculado pela solução inversa das equações de Laplace para a maré, utilizando os dados coletados pelo Projeto TOPEX/POSEIDON⁶, disponibilizado internamente no Modelo TELEMAC-3D. Desta forma, são consideradas 33 componentes harmônicas da maré para se ter uma estimativa bastante confiável da superfície do oceano (Linha azul e rosa na Figura 8).

Dado que a elevação do nível do mar é conhecida num ponto da borda, a Equação da Continuidade é integrada e as componentes da velocidade de corrente são obtidas. Esta mesma

⁵<http://volkov.oce.orst.edu/tides/otis.html>

⁶<http://volkov.oce.orst.edu/tides/global.html>

fonte de dados fornece os dados de velocidade de corrente prescritos nos contornos oceânicos norte e sul (Linha azul na Figura 8).

2.1.2 Fronteira superficial

A fronteira superficial da malha computacional é forçada dinamicamente com resultados do modelo global ECMWF (*European Center for Medium-Range Weather Forecast*⁷), com contribuição de velocidade do vento, temperatura do ar e pressão atmosférica do conjunto de reanálise (na superfície) com intervalo com uma resolução temporal de 6 h e espacial de 0.75°, *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts interim reanalysis*(ERA Interim ECMWF⁸), utilizados em trabalhos como os de [MARQUES ET AL., 2010B; FERNANDES ET AL., 2021].

2.1.3 Fronteiras continentais

Para as fronteiras continentais da malha das simulações, foram utilizados dados diários de vazão do Rio Guaíba e Rio Camaquã, obtidos junto à Agência Nacional das Águas (ANA⁹). Para a vazão do Canal São Gonçalo foram utilizados dados de nível obtidos através da Agência da Lagoa Mirim (ALM¹⁰) e transformados em dados diários de vazão a partir da curva-chave Oliveira et al. [2015], e posteriormente calculada a sua climatologia para o intervalo de tempo de (1991 – 2012) (Pontos cianos na Figura 8).

2.1.4 Parâmetros físicos considerados nas simulações

Um resumo dos principais parâmetros físicos utilizados nas simulações é apresentado na Tabela a seguir.

⁷<http://www.ecmwf.int>

⁸<https://www.ecmwf.int>

⁹<http://www.ana.gov.br>

¹⁰<https://wp.ufpel.edu.br/alm/agencia>

Tabela 1: Parâmetros adotados no modelo TELEMAC-3D

PARAMÊTROS	VALORES
<i>CORIOLIS COEFFICIENT</i>	-7.70×10^{-5}
<i>HORIZONTAL TURBULENCE MODEL</i>	<i>Smagorinski</i>
<i>VERTICAL TURBULENCE MODEL</i>	Comprimento de mistura
<i>TIDAL FLATS</i>	<i>Yes</i>
<i>TIME STEP</i>	60 s
<i>LAW OF BOTTOM FRICTION</i>	<i>Nikuradse</i>
<i>FRICTION COEFFICIENT FOR THE BOTTOM</i>	1×10^{-5}
<i>MEAN DIAMETER OF THE SEDIMENT</i>	1×10^{-5} m
<i>CRITICAL SHEAR STRESS FOR EROSION</i>	1.5 N/m^2
<i>CRITICAL SHEAR STRESS FOR DEPOSITION</i>	0.15 N/m^2
<i>GIBSON CONSOLIDATION MODEL</i>	<i>Yes</i>
<i>MAXIMUM CONCENTRATION OF THE CONSOLIDATED MUD</i>	1500.0 kg/m^3
<i>FLOCCULATION COEFFICIENT</i>	0.3
<i>COEFFICIENT OF WIND INFLUENCE</i>	3×10^{-6}

2.1.5 Malha de elementos finitos e triangulares

O domínio das malhas se estende entre 30° e 36° ao sul, 48° e 54° a oeste, incluindo a Lagoa dos Patos, uma extensa parte da Plataforma Continental do Sul do Brasil e região abissal. Após ser realizado testes e ajustes, as malhas finais possuem cerca de 100.000 elementos, ou 52.000 pontos, esse ambas com 7 níveis sigmas e sua profundidade se estende até 2.427 m de profundidade. A simulação necessita de computadores potentes para executar simulações que duram de sete a cinco dias. Foram empregadas malhas de elementos finitos e triangulares, confeccionadas com o *software* BlueKenue.

Amplamente empregado para modelagem hidráulica, permitindo visualização e facilidade no manuseio de informações georreferenciadas, além de importação e exportação dos dados em diferentes formatos.

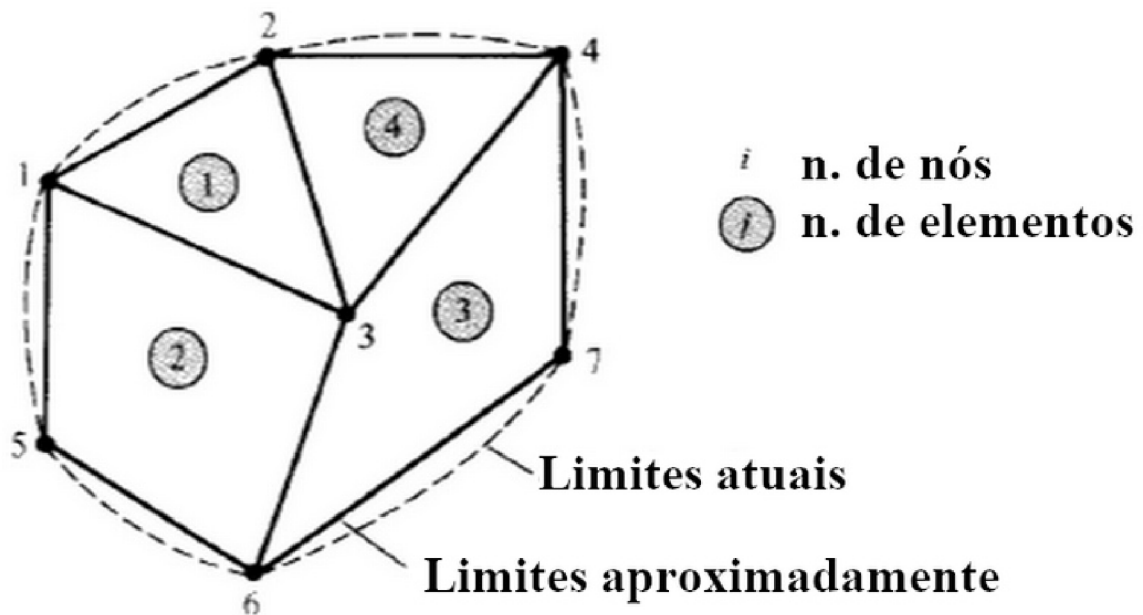


Figura 9: Exemplo de interação dos elementos infinitos e triangulares de 4 elementos e 7 nós.

Na Figura 9, de 4 elementos e 7 nós. Procura-se uma aproximação para o potencial V_e dentro de um elemento. Relacionai-se as distribuições de potencial em vários elementos, tal que o potencial seja contínuo através dos contornos entre os elementos interrelacionados. A solução aproximada para toda a região é [SADIKU, 2004]:

$$V(x,y) = \sum_{N=1}^{e=1} V_e(x,y) \quad (8)$$

A aproximação para V_e no interior de um elemento é a aproximação polinomial. Para um elemento triangular tem-se:

$$V(x,y) = a + bx + cy \quad (9)$$

Usando aproximações lineares em um conjunto de triângulos, que Pelosi [2007] chamou-os “elementos”, ele deu alguns exemplos bidimensionais e nasceu o Método dos Elementos Finitos. Ele permaneceu adormecido por meia geração, provavelmente a esperar computadores para serem inventados. Os elementos finitos são conectados por pontos nodais. Ao conjunto de todos esses itens, elementos e nós, chama-se malha. O resultado são subdivisões geométricas que recebe as condições de contorno e iniciais, serão resolvidas de maneira não exata, mas à cerca deste método numérico.

Já que a precisão do Método dos Elementos Finitos (MEF) depende da quantidade de nós e elementos, do tamanho e dos tipos da malha. Ou seja, quanto menor for o tamanho e maior for o número deles em uma determinada malha, melhor será a precisão nos resultados da análise [MARQUES ET AL., 2010C] (Figura 10). A distância entre os nós, é calculada em função de informações fornecidas pelo usuário, em amplos formatos, permitindo a importação e exportação de dados para outros *software* [COPPOLA-OWEN AND CODINA, 2007].

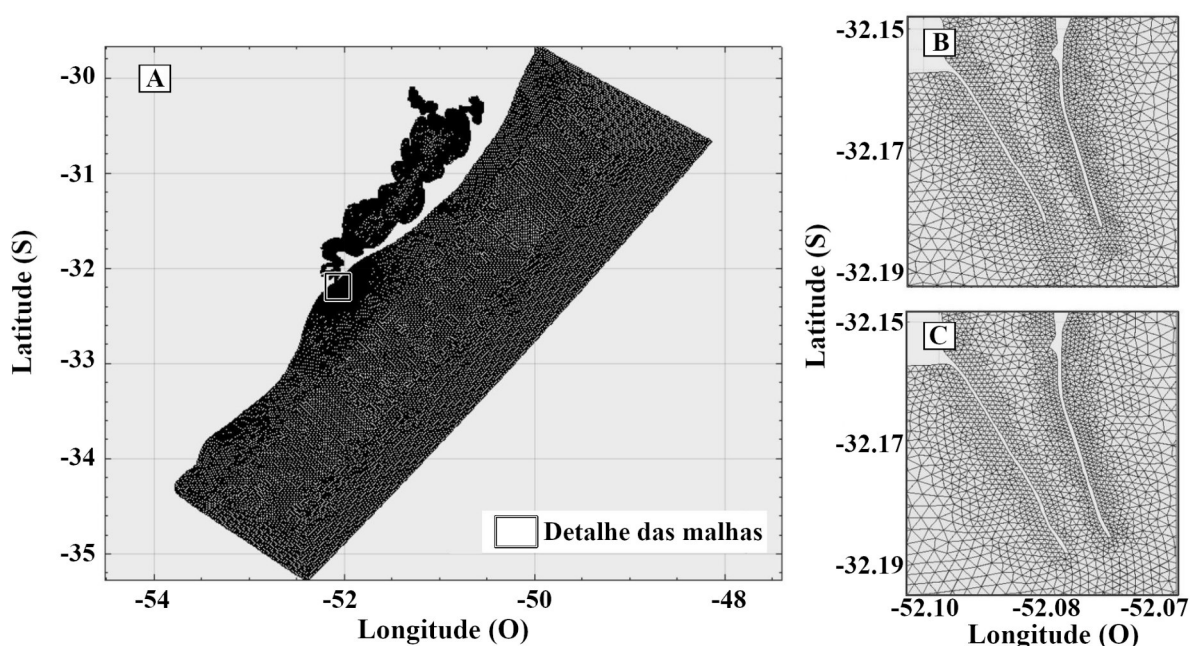


Figura 10: A Malha geral da área de estudo; as diferenças entre as malhas, sendo: B. Cenário I: pré-ampliação dos Molhes em 2010; C. Cenário II: pós-ampliação dos Molhes.

Assim o tamanho do domínio das malhas garante que as elevações e correntes formadas pelo vento e variações de pressão atmosférica se desenvolvam na plataforma continental. A discretização vertical adotada para o modelo hidrodinâmico possui variação na superfície livre, já a elevação (z) permite observar alterações ao longo dos passos de tempo de cada simulação. Dessa forma uma transformação de variáveis é empregada para que a estrutura vertical da malha não mude a cada passo de tempo executado. As dimensões adotadas das malhas, passaram por várias tentativas de melhor configuração a ser adotada; O que garantem melhor desempenho das simulações, sendo as bordas mantidas distantes o suficiente da região da pluma da Lagoa dos Patos, evitando assim que problemas com inconsistências numéricas originadas na borda (devido à imposição de condições de contorno) que afetem a área de interesse.

2.2 Módulo SEDI-3D

Modelos de transporte de sedimentos foram desenvolvidos e aplicados pela comunidade de engenheiros do *Open TELEMAC Mascaret* para estimar taxas de transporte e evoluções morfodinâmicas do leito nos fluxos dos rios, condições costeiras e estuarinas. Uma ampla gama de processos para representar sedimentos interações de fluxo em situações cada vez mais complexas (sedimentos coesos, não coesos e mistos). Apesar de alguns avanços nas técnicas numéricas e recursos de computação, a qualidade e precisão do modelo fazem os resultados dependerem principalmente das inúmeras escolhas e habilidades do modelador [VILLARET AND JODEAU, 2017].

2.2.1 Fundamento teórico

O transporte de sedimentos coesivos ocorre na água através da combinação de advecção e difusão. No modelo SEDI-3D, de difusão-advecção é resolvida considerando as partículas de sedimento coesivo movendo-se na mesma velocidade que o fluido [SMOLDERS ET AL., 2018]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U_j \frac{\partial C}{\partial x_j} = \frac{\partial C}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_t} \frac{\partial C}{\partial x_j} + w_s C \delta_{i3} \right) \quad (10)$$

Nesta equação, U é a velocidade média do fluxo (m/s), t é o tempo (s), x_j representa os componentes do vetor de coordenadas m, ν_t é a viscosidade turbulenta (m^2/s), σ_t é o número turbulento de Prandtl - Schmidt (ou seja, a razão de ν_t para a difusividade turbulenta das partículas de sedimento), C é a concentração de sedimento g/L ou kg/m^3), w_s é a velocidade de estabilização média representativa (m/s), e δ_{ij} é o delta de Kronecker. Na interface entre a coluna de água e a camada do leito, processos de erosão acontecem devido ao movimento de cisalhamento do fluxo. O fluxo de erosão é calculado com a fórmula de Partheniades. O fluxo de erosão é o produto de uma taxa de erosão multiplicada por um fator de probabilidade em função da tensão de cisalhamento mais uma tensão de cisalhamento de erosão crítica [SMOLDERS

ET AL., 2018]:

$$\begin{cases} M = \left(\frac{\tau_b}{\tau_{ce}} - 1 \right) & \text{se } \tau_b > \tau_{ce} \\ 0 & \text{de outra forma} \end{cases} \quad (11)$$

com M a constante de erosão Krone-Partheniades (kg/m^2), τ_b a tensão de cisalhamento da camada e τ_{ce} a tensão crítica de cisalhamento da cama para erosão. Portanto, a erosão só ocorre quando a tensão de cisalhamento do leito é maior que a tensão crítica de cisalhamento do leito para a erosão definida pelo do usuário. A constante de erosão M determina a intensidade da erosão. Um valor maior significará mais erosão se a erosão ocorre. A tensão de cisalhamento da camada é dada por:

$$\tau_b = \rho_w u_* |u_*| \quad (12)$$

com ρ_w densidade da água e u_* a velocidade de atrito. Em SEDI-3D, uma lei de atrito quadrática é usada com um coeficiente de arrasto C_D para calcular τ_b em um regime bruto. Quando um coeficiente de Manning é usado, as equações são as seguintes:

$$\tau_b = \frac{1}{2} \rho_w C_D \bar{U} |\bar{U}| \quad (13)$$

com:

$$C_D = 2n^2 \frac{g}{h^{\frac{1}{3}}} \quad (14)$$

onde $\bar{U}$ é a velocidade média da profundidade (que também é calculado na SEDI-3D), n é o coeficiente de Manning, g é a constante gravitacional (m/s) e h é a profundidade da água (m). Após o cálculo desta tensão de cisalhamento, a velocidade de cisalhamento é calculada e então imposta na parte inferior como uma condição de contorno para resolver as equações de conservação do momento do fluxo. A lei de deposição empírica de Krone é implementada em SEDI-3D para estimar a deposição de sedimentos. Aqui, o fluxo de deposição é aproximado pelo produto da concentração local de sedimentos com a velocidade de sedimentação, multiplicado por uma probabilidade de deposição [SMOLDERS ET AL., 2018].

A evolução do leito em SEDI-3D é calculada através da equação Exner:

$$(1 - \lambda) \frac{\partial z_b}{\partial t} + (E - D) = 0 \quad (15)$$

onde λ é a porosidade do leito e z_b é o nível do leito.

2.2.2 Parâmetros para a simulação com material em suspensão (silte fino)

Na simulação 3D com material em suspensão (silte fino), foi utilizado o acoplamento com o módulo SEDI-3D. As fontes desse material foram configuradas com as descargas nos rios Guaíba, Camaquã e Canal São Gonçalo. As concentrações do sedimento em suspensão foram respectivamente 0.3, 0.2 e 0.25 g/L [MARQUES ET AL., 2010C; SILVA ET AL., 2015; BITENCOURT ET AL., 2020; FERNANDES ET AL., 2021]. Os parâmetros físicos e equacionamento para o material em suspensão, são apresentados a seguir:

Tabela 2: Parâmetros adotados para o acoplamento do módulo SEDI-3D

Parâmetros	Valores
Tamanho do grão (Sedimento coesivos)	1×10^{-5} m
Velocidade de deposição	1×10^{-5} m/s
Tensão para deposição	0.1 N/m^2
Tensão para ressuspensão	1.5 N/m^2
Coeficiente de erosão	2×10^{-3}
Densidade do sedimento seco	0.1 kg/m^3
Fórmula de concentração de referência	Equilibrium Formula (Zysderman and Fredsoe)
Com flocação formula de Van Leussen com coeficiente de flocação	0.3
Coeficiente para destruição do floco	0.09

Não foi considerada a consolidação do material no fundo, o sedimento deposita quando as

tensões são menores que 0.1 N/m^2 (Tensão para deposição), e ressuspende quando os valores de tensão são maiores que 1.5 N/m^2 (Tensão para ressuspensão).

2.3 Calibração e validação do modelo hidrodinâmico

O TELEMAC-3D vem sendo utilizado no Laboratório de Oceanografia Costeira e Estuarina da FURG desde 2002, e temporalmente passou por diversos exercícios de calibração e validação, detalhados nos trabalhos de monografias, dissertações, teses e artigos científicos produzidos pelo grupo, onde se destacam: Fernandes et al. [2002]; Marques et al. [2010b,a]; da Silva [2018]; Fernandes et al. [2021], dentre outros. Também era utilizado pelo Laboratório de Análise Numérica e Sistemas Dinâmicos, para desenvolvimento de projetos, consultorias e trabalhos na área da modelagem numérica aplicada à oceanografia costeira e estuarina [DA SILVA ET AL., 2019; BENDÔ, 2019].

Os resultados destes exercícios de calibração e validação, indicaram que o modelo reproduz adequadamente as condições ambientais (corrente, nível e salinidade) observadas na Lagoa dos Patos, seu estuário e zona costeira adjacente. Neste trabalho foram executados exercícios de calibração e validação do TELEMAC-3D com base em dados medidos durante os anos de 2005 e 2017, obtidos através do Projeto Cassino, e dados do Projeto Pesquisa Ecológica de Longa Duração — PELD¹¹. A resposta do Modelo TELEMAC-3D à variação dos principais parâmetros físicos que controlam a hidrodinâmica do ambiente, e sua capacidade de reproduzir as condições ambientais observadas na área de estudo, foram avaliadas durante as etapas de calibração e validação, respectivamente.

No exercício de calibração da hidrodinâmica, foram considerados inicialmente dados de velocidade e direção de correntes para o mês de dezembro de 2005 na Lagoa dos Patos. Estes dados foram obtidos por um *Acoustic Doppler Profiler* — ADP Sontek, de 1000 Hz com resolução temporal de 1h, fundeado na Estação de Praticagem a 12 m de profundidade e localizado a $32^\circ 08' 12'' \text{ S}$ e $52^\circ 06' 09'' \text{ W}$ (Figura 13).

Para a validação da modelagem hidrodinâmica, foram utilizados dados de salinidade para o período de janeiro de 2017, obtidos por coleta de amostras, localizado a $31^\circ 55' 06'' \text{ S}$ e 52°

¹¹<https://peld.furg.br/>

07' 07" W (Figura 13), fundeado a 4 m de profundidade, no âmbito do Projeto PELD, com taxa de aquisição horária.

2.3.1 Calibração do modelo

A capacidade do modelo numérico de reproduzir as condições ambientais foi avaliada através da comparação entre os resultados do modelo e séries temporais de correntes descritas acima. A qualidade dos resultados do modelo foi avaliada através do cálculo de correlação entre a velocidade de corrente simulada e medida, e através da aplicação dos índices *Relative Mean Absolute Error* (*RMAE* — Equação 16) e o *Root Mean Square Error* (*RMSE* — Equação 17) [HELENA FERNANDES ET AL., 2001].

$$RMAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\hat{\theta}_i - \theta_i| \quad (16)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{\theta}_i - \theta_i)^2} \quad (17)$$

O *RMAE* permite classificar a qualidade dos resultados em uma escala de ruim à excelente (Tabela 1), enquanto o *RMSE* informa a magnitude do erro com valores dimensionais. Assim, ambas as medidas expressam o erro médio do modelo preditivo, em relação aos dados originais e testes. Estão, no intervalo 0-infinito e retornam a magnitude dos erros e não sua direção. Por fim, quanto menor, melhor em ambos os casos.

Tabela 3: Qualificação *Relative Mean Absolute Error* (*RMAE*).

Qualificação	<i>RMAE</i>
Excelente	<0.2
Boa	0.2 — 0.4
Razoável	0.4 — 0.7
Pobre	0.7 — 1.0
Ruim	>1.0

O exercício de calibração do modelo hidrodinâmico (TELEMAC-3D) foi realizado para o

período de dezembro 2005, para o qual dados de velocidade de corrente obtidos na Praticagem estavam disponíveis. O modelo foi rodado utilizando as mesmas categorias de condição inicial e de contorno apresentados na Seção 2.1. Foram realizados 45 testes de calibração variando-se o coeficiente de atrito do vento e valores para coeficientes de difusão horizontal e vertical de velocidade, e para o traçador (salinidade) (Tabela 2). O coeficiente de influência do vento (C_w) foi o fator que mais influenciou nos resultados do modelo, tendo sido testado com valores variando entre 1×10^{-7} e 1×10^{-4} . No entanto, o valor que mostrou melhores resultados foi 3×10^{-6} . A melhor reprodução dos dados ambientais foi atingida pelo modelo no Teste 40, a tabela a seguir mostram os parâmetros testados na calibração do modelo.

Tabela 4: Parâmetros testados na calibração do modelo

TESTES	Coef. de vento (m/s)	Coef. difusão Horiz. (cm ² /s)	Coef. difusão vertic. (cm ² /s)
TESTE 1	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}
TESTE 2	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-3}
TESTE 3	1.0×10^{-4}	1.0	1.0
TESTE 4	1.0×10^{-4}	10.0	10.0
TESTE 5	1.0×10^{-4}	30.0	1.0×10^{-6}
TESTE 6	1.5×10^{-4}	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}
TESTE 7	1.5×10^{-4}	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-3}
TESTE 8	1.5×10^{-4}	1.0	1.0
TESTE 9	1.5×10^{-4}	10.0	10.0
TESTE 10	1.5×10^{-4}	30.0	1.0×10^{-6}
TESTE 11	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}
TESTE 12	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-3}
TESTE 13	1.0×10^{-5}	1.0	1.0
TESTE 14	1.0×10^{-5}	10.0	10.0
TESTE 15	1.0×10^{-5}	30.0	1.0×10^{-6}
TESTE 16	1.5×10^{-5}	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}

TESTES	Coef. de vento (m/s)	Coef. difusão Horiz. (cm ² /s)	Coef. difusão vetic. (cm ² /s)
TESTE 17	1.5x10 ⁻⁵	1.0x10 ⁻³	1.0x10 ⁻³
TESTE 18	1.5x10 ⁻⁵	1.0	1.0
TESTE 19	1.5x10 ⁻⁵	10.0	10.0
TESTE 20	1.5x10 ⁻⁵	30.0	1.0x10 ⁻⁶
TESTE 21	1.0x10 ⁻⁶	1.0x10 ⁻⁶	1.0x10 ⁻⁶
TESTE 22	1.0x10 ⁻⁶	1.0x10 ⁻³	1.0x10 ⁻³
TESTE 23	1.0x10 ⁻⁶	1.0	1.0
TESTE 24	1.0x10 ⁻⁶	10.0	10.0
TESTE 25	1.0x10 ⁻⁶	30.0	1.0x10 ⁻⁶
TESTE 26	1.5x10 ⁻⁶	1.0x10 ⁻⁶	1.0x10 ⁻⁶
TESTE 27	1.5x10 ⁻⁶	1.0x10 ⁻³	1.0x10 ⁻³
TESTE 28	1.5x10 ⁻⁶	1.0	1.0
TESTE 29	1.5x10 ⁻⁶	10.0	10.0
TESTE 30	1.5x10 ⁻⁶	30.0	1.0x10 ⁻⁶
TESTE 31	1.8x10 ⁻⁶	1.0x10 ⁻⁶	1.0x10 ⁻⁶
TESTE 32	1.8x10 ⁻⁶	1.0x10 ⁻³	1.0x10 ⁻³
TESTE 33	1.8x10 ⁻⁶	1.0	1.0
TESTE 34	1.8x10 ⁻⁶	10.0	10.0
TESTE 35	1.8x10 ⁻⁶	30.0	1.0x10 ⁻⁶
TESTE 36	3.0x10 ⁻⁶	1.0x10 ⁻⁶	1.0x10 ⁻⁶
TESTE 37	3.0x10 ⁻⁶	1.0x10 ⁻³	1.0x10 ⁻³
TESTE 38	3.0x10 ⁻⁶	1.0	1.0
TESTE 39	3.0x10 ⁻⁶	10.0	10.0
TESTE 40	3.0x10 ⁻⁶	30.0	1.0x10 ⁻⁶
TESTE 41	1.0x10 ⁻⁷	1.0x10 ⁻⁷	1.0x10 ⁻⁷
TESTE 42	1.0x10 ⁻⁷	1.0x10 ⁻³	1.0x10 ⁻³
TESTE 43	1.0x10 ⁻⁷	1.0	1.0
TESTE 44	1.0x10 ⁻⁷	10.0	10.0
TESTE 45	1.0x10 ⁻⁷	30.0	1.0x10 ⁻⁶

A Figura 11 apresenta a comparação entre os dados de intensidade da velocidade de corrente calculados pelo modelo e os medidos pelo ADP, na profundidade de 12 m (Figura 11 A) e 0 m (Figura 11 B). A linha contínua em vermelho indica os resultados do modelo, enquanto os dados do ADP são representados pela linha azul tracejada. Observa-se que o modelo representa bem as tendências de aumento e diminuição das intensidades de velocidade de corrente, porém em alguns momentos subestima os valores.

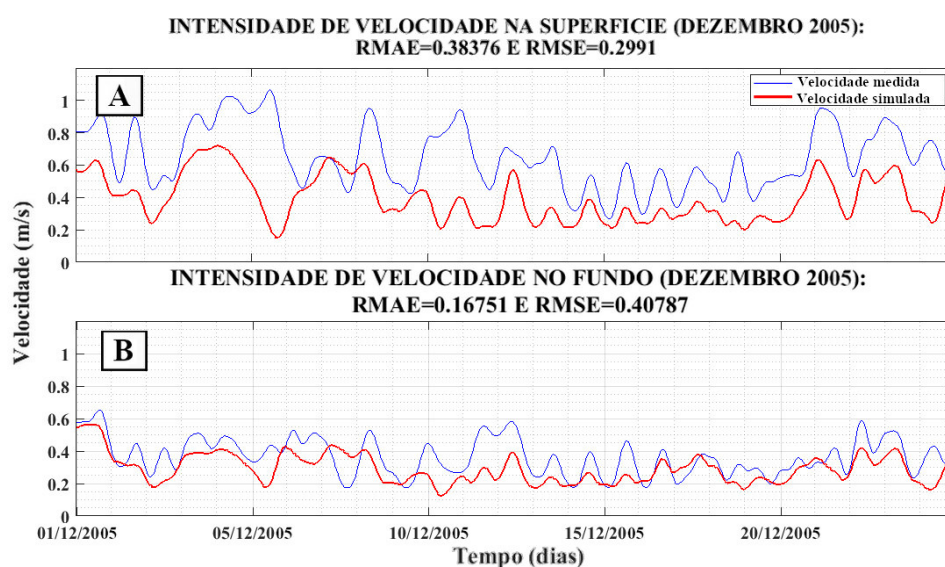


Figura 11: Evolução temporal da intensidade de corrente medidas pelo ADP (linha azul tracejada) na Praticagem em dezembro de 2005 e calculada pelo modelo (linha contínua em vermelho). Profundidade de 12 m (A) e profundidade 0 m (B.).

O RMAE calculado foi de 0.383 para superfície (12 m) e 0.167 para profundidade (0 m), classificando a reprodução do modelo como excelente e boa respectivamente [J., SUTHERLAND; D.J.R., WALSTRAB; T.J., CHESHERA; L.C., VAN RIJN E H.N., 2004].

Tabela 5: Qualificação dos resultados

Nível	RMAE	RMSE	Qualificação
Superfície	0.39	0.30	Boa
Fundo	0.17	0.41	Excelente

O RMSE calculado (ver Tabela 3) foi de 0.299 m/s para 12 m e 0.407 m/s para 0 m de profundidade. Uma característica do *RMSE* é que os erros (reais — previsões) são elevados ao quadrado antes de ter a média calculada. Portanto, pesos diferentes serão atribuídos à soma

e, conforme os valores de erros das instâncias aumentam o índice do *RMSE* aumenta consideravelmente, como se apresentou com o resultado do fundo. Ou seja, se houver um *outlier* no conjunto de dados, seu peso será maior para o cálculo do *RMSE* por conseguinte, prejudicará sua métrica deixando-a maior.

Erros muito pequenos favorecem o *RMSE*, ao passo que, conforme os erros *RMSE* aumentam, o *RMAE* fica menor. Para erros entre 0 e 1 (altíssima acurácia), o $RMSE \leq RMAE$, desta forma o *RMSE* tem a tendência a ter valores crescentes e o *RMAE* cresce à medida que o tamanho da amostra de teste aumenta. Já para o caso da superfície, o $RMAE < RMSE$, representa uma pequena variâncias entre as métricas, que apresenta uma variância uniforme, o que também é aceitável ao se comparar modelos reais.

2.3.2 Validação do modelo

A validação do modelo hidrodinâmico TELEMAC-3D foi realizada considerando o conjunto de parâmetros físicos que deram os resultados na etapa de calibração do modelo.

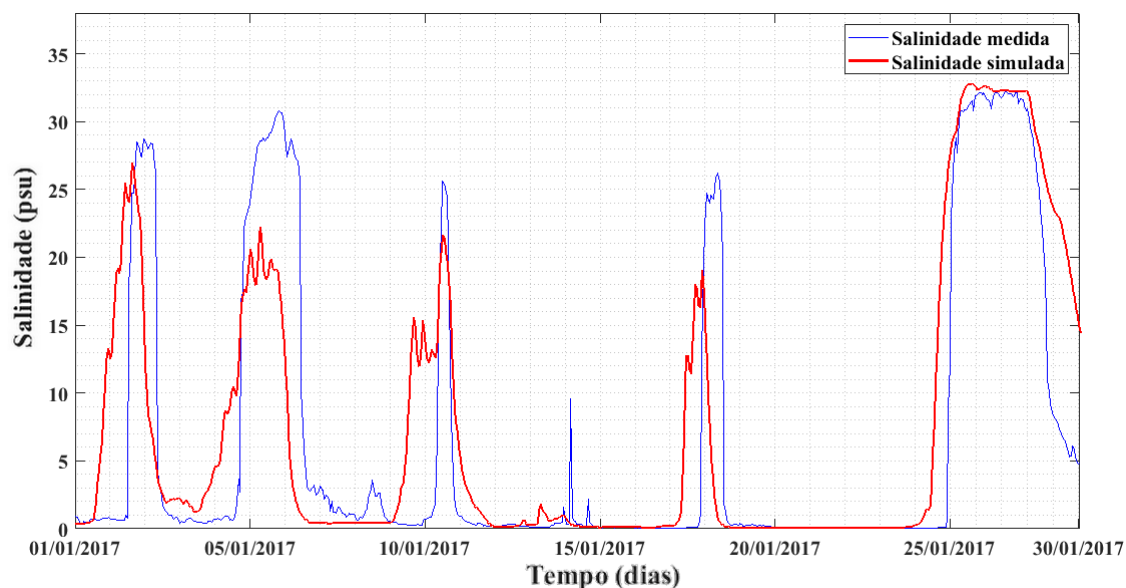


Figura 12: Evolução temporal da salinidade calculada pelo modelo (linha azul contínua) e medida pelo CT (linha vermelha tracejada) na estação Projeto PELD.

Na etapa da validação, foi avaliada a capacidade do modelo de reproduzir o comportamento da salinidade no ambiente através da comparação da previsão do modelo para o período de janeiro de 2017 e os dados medidos neste mesmo período (Figura 12).

A Figura 12 apresenta a evolução temporal da salinidade calculada pelo modelo e medida em campo, Projeto PELD (ver Figura 13), ambas na profundidade 4 m. O *RMSE* calculado foi de 7.37 psu (em um range de 0 a 35) e o *RMAE* foi de 0.228, o que classifica a reprodução do modelo como, boa [J., SUTHERLAND; D.J.R., WALSTRAB; T.J., CHESHERA; L.C., VAN RIJN E H.N., 2004]. O transporte de sal é um fenômeno complexo e depende tanto do transporte advectivo quanto do difusivo, sendo assim, um *RMAE* de 0.228 indica que o modelo conseguiu reproduzir um fenômeno complexo com confiabilidade. Com base na reprodutibilidade alcançada pelo modelo TELEMAC-3D nos exercícios de calibração e validação apresentados, o Modelo pode ser considerado uma ferramenta adequada para o estudo proposto.

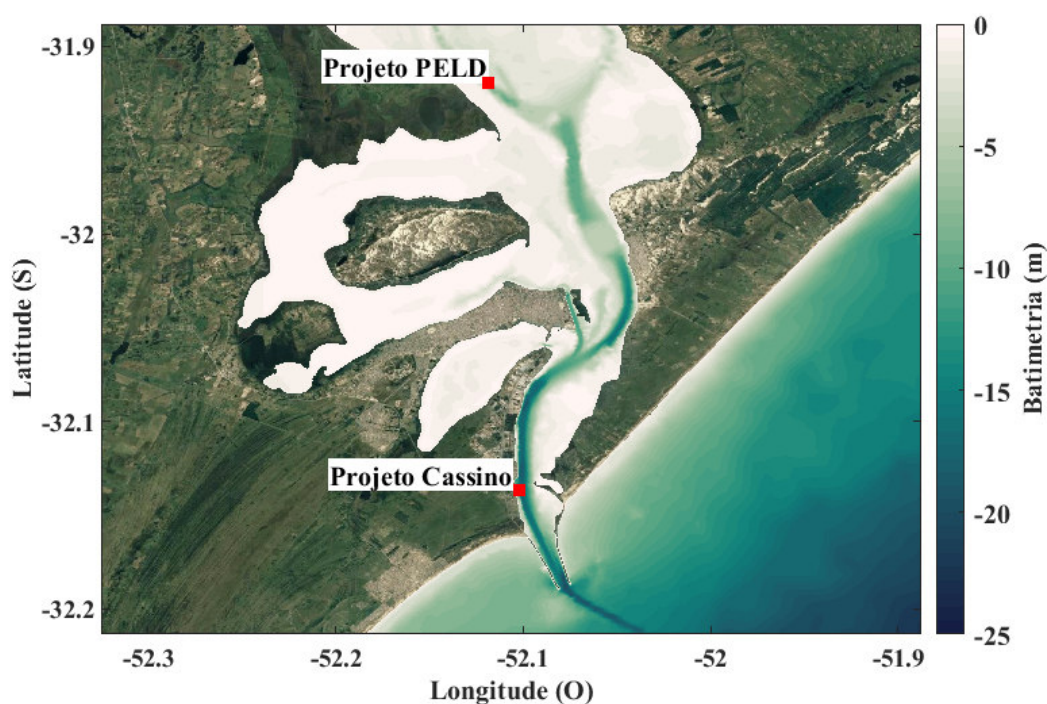


Figura 13: Localização dos equipamentos cujos dados foram utilizados para os exercícios de calibração e validação do modelo TELEMAC-3D.

2.4 Estudo de Caso

No estudo de caso, foi considerado o ano de 2015, para ser possível observar melhor as alterações hidrodinâmicas impostas nos cenários. Para caracterizar a pluma da Lagoa dos Pa-

tos de forma horizontal e vertical, foi considerado um ano de forte contribuições atmosférico-oceânico: *El niño* — *Southern Oscillation* (ver Figura 14). Onde os índices de precipitações mostrando-se mais significativos, exercendo influência de fatores climáticos, como a temperatura na superfície do mar, precipitação, ventos com alterações de quadrantes, além da permanência de enchentes em função do tempo [SOPPA ET AL., 2011].

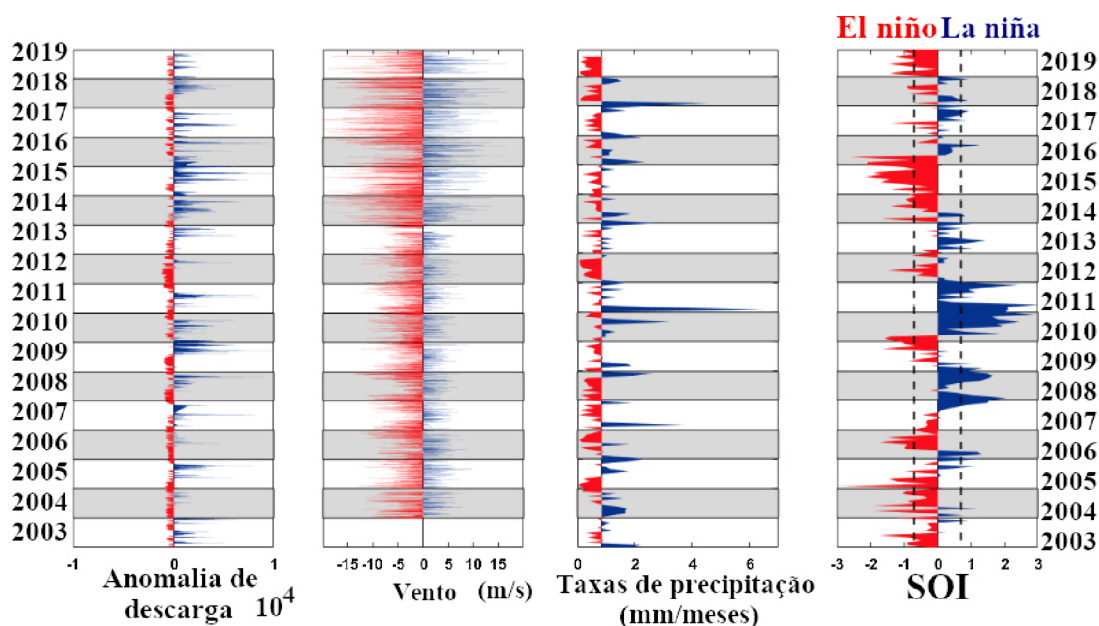


Figura 14: Eventos de *El niño* para os anos de 2008 – 2015, apresentando: anomalia de descarga, vento, taxas de precipitação e Índice de Oscilação Sul (IOS). Adaptado de Bitencourt et al. [2020].

A descarga fluvial é um dos dados mais relevantes ao se trabalhar com um dos ciclos de *el niño*, como afirma Marques et al. [2010b]: o ciclo de oscilação anual (com cerca de 340 dias), que está associado ao padrão de precipitação de regiões temperadas, com máximas ocorrendo nos períodos de inverno e primavera. Desta forma, será possível estudar os resultados com mais evidências sobre as diferenças entre os cenários (ver Figura 15). A maior enchentes fluvial e sua vazante (cerca de 43 580 m³/s) no ano de 2015 foi no período dos dias: 06/10/2015 – 07/10/2015, chamado Período 2 (ver faixa rosa na Figura 15), ambas resultando na formação da pluma extensa na plataforma.

Para se realizar correlações entre os resultados extraídos dos cenários, foi aplicada a correlação significativa do coeficiente de Spearman, uma medida não paramétrica de estatística de dependência e avalia a relação monotônica entre duas variáveis. Uma perfeita monotonia da função ocorre um valor de -1 ou 1 para o coeficiente de correlação de Spearman, e 0 ocorreu

nenhuma correlação. Um coeficiente de correlação positiva ou negativa significa que a rede é uma mistura associativa ou desassociativa.

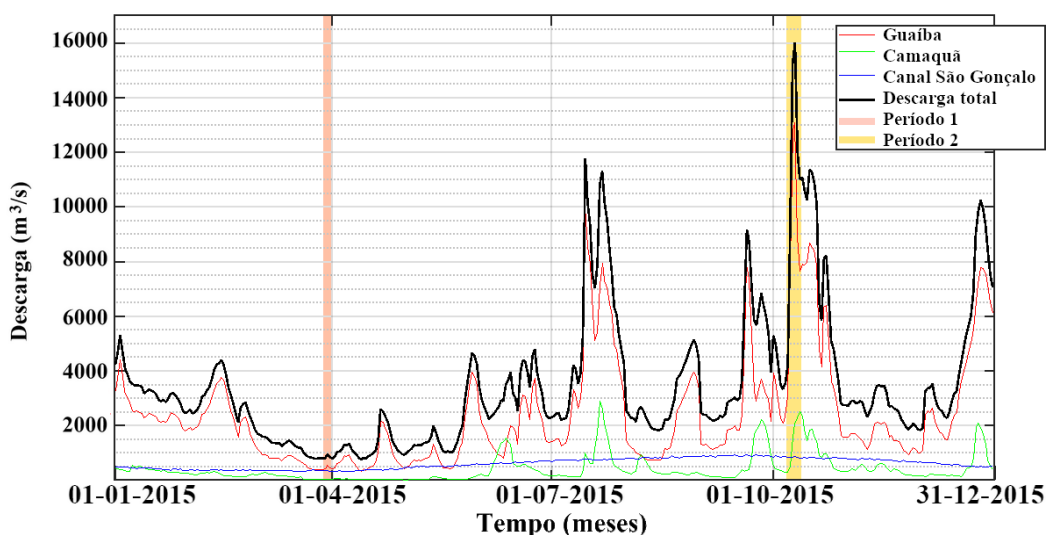


Figura 15: Série temporal de descarga para os três principais tributários da Lagoa dos Patos, para o ano de 2015. Destacando também, a menor ($760 \text{ m}^3/\text{s}$, Período 1) e a maior descarga (cerca de $43580 \text{ m}^3/\text{s}$, Período 2), utilizados para análise dos resultados.

Por fim, foram realizadas análises nas mudanças no padrão de deposição como executado por Silva et al. [2015], apresentando a quantidade de material depositada no intervalo de tempo ($\text{kg.m}^2/\text{s}$) esse material que vem com a pluma está sendo depositado no canal e redistribuição de sedimentos finos nos cenários, é a análise com as médias de vazante os campos de velocidade média calculado pelo TELEMAC-3D para as diferenças na geometria dos cenários simulados são mais evidentes. Para isso fazemos a diferença de deposição distribuição espacial regiões com menor (Período 1) e o maior período (Período 2) de descarga (ver Figura 15), da mesma forma a diferença sobre a evolução de fundo dos cenários, podendo ser relacionadas à velocidade média das descargas.

Para ser possível observar como a obra dos Molhes da Barra influenciou o comportamento da pluma, foram utilizados pontos conforme as coordenadas cartesianas, para cada malha dos cenários I e II, sendo: ponto ao sul, ponto a oeste e ponto ao norte, como mostrado na Figura 16 A. Séries temporais foram extraídas desses pontos. Em seguida, foi realizada a análise temporal dos campos médios superficiais e outras estatísticas dos Cenários I e II. Para observar verticalmente o comportamento da pluma e as diferenças entre os resultados, foram extraídos

transectos a partir dos mesmos pontos, nas direções sul — norte e oeste — leste (Figura 16 B).

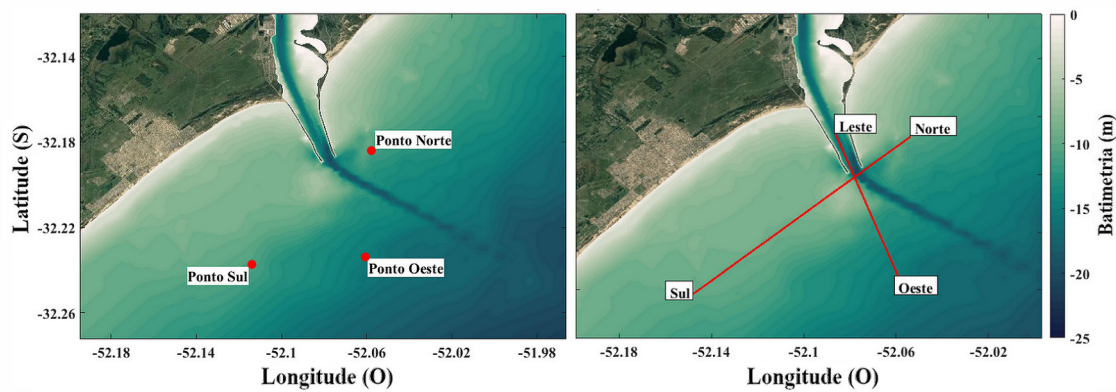


Figura 16: (A) Pontos de extração de dados para séries temporais e média da superfície para ambas as malhas simuladas, com três pontos de observação: ponto ao sul (PS), ao oeste (PO) e ao norte (PN). Os mesmos pontos foram usados para extrair o transecto, de modo a observar os resultados das simulações, acrescentando o ponto ao leste (PL), e obtendo transectos nas direções sul — norte e oeste — leste (B).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados e discussões sobre as simulações de estudo de caso para ambos os cenários e períodos selecionados no ano de 2015 (ver Subcapítulo 2.4). Dos resultados foram utilizados dois intervalos das séries de baixa e alta descarga, para assim, observar as implicações das alterações dos Molhes da Barra.

3.1 Formação da pluma

O estudo de caso teve como ano de simulação um ano de *El Niño*, de 2015 – 16, um dos mais fortes já registrados e que também apresentou características típicas de um *El Niño* canônico¹² [INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS, 2014]. O Oceano Atlântico Sudoeste é uma das regiões mais dinâmicas e vulneráveis do oceano global, no que se refere à suscetibilidade às mudanças climáticas [PARISE ET AL., 2009].

É uma região potencial para catástrofes — eventos meteorológicos e oceanográficos tanto dos oceanos (por exemplo, ciclones tropicais e extra-tropicais) quanto da terra (por exemplo, descarga de rios). Estes fenômenos impactam várias questões de segurança nacional devido à ocorrência de ondas mais altas e aumento do nível do mar na costa, precipitação mais forte causando inundações e condições de vento severas [TÁVORA ET AL., 2020].

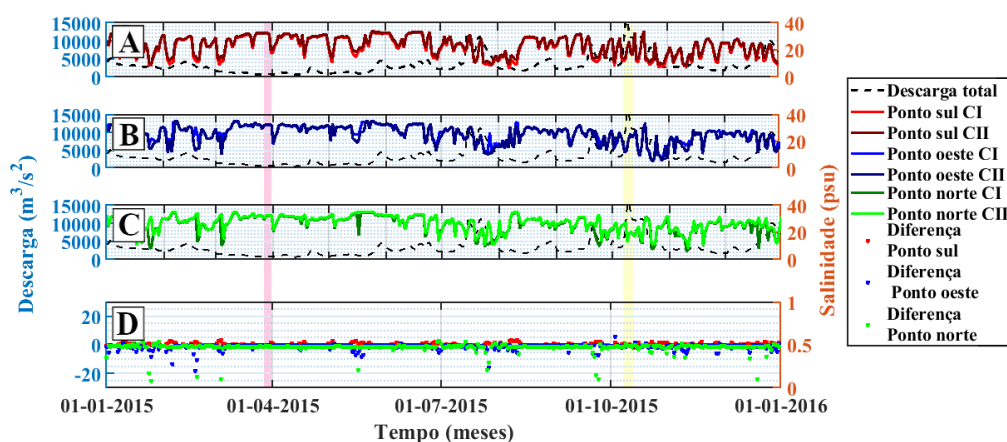


Figura 17: Descarga total da Lagoa dos Patos (linha tracejada) e os resultados de salinidade superficial do modelo nos pontos extraídos. Sendo Ponto sul Cenário I e Cenário II (A) e Ponto leste Cenário I e Cenário II (B), Ponto norte Cenário I e Cenário II (C) e em (D) é apresentada a diferença entre os dados.

¹²*El Niño* do Pacífico oriental ou Canônico, envolve uma propagação para leste de temperatura da superfície do mar positivas no Pacífico Equatorial oriental a partir da costa da América do Sul [VIEGAS ET AL., 2019].

A descarga média de água doce da Lagoa dos Patos está em torno de $2.400 \text{ m}^3/\text{s}$ [VAZ ET AL., 2006]. Na Figura 17, apresentamos a salinidade superficial e a descarga total, onde consideramos somente dois primeiro período de observação, um com descarga cerca de $760 \text{ m}^3/\text{s}$, alcança uma salinidade de 30 psu em ambos os cenários. Já no segundo período, que apresenta vazão de cerca de $16.000 \text{ m}^3/\text{s}$, a salinidade apresenta-se com valores entre 10 e 30 psu, os valores diferentes são decorrentes da diferença entre os cenários.

O ENOS tem uma grande contribuição na modulação da circulação atmosférica e nas anomalias de precipitação no Sul do Brasil, ou seja, na precipitação (excesso de chuvas) no Sul do Brasil durante sua fase quente, enquanto acontece o oposto na região Nordeste do Brasil. Durante a fase fria (*La Niña*) do ENOS, uma situação oposta é esperada. Os autores Grimm et al. [2000], mostraram que o episódio de ENOS, influenciam significativamente a precipitação sazonal nas regiões sudeste e sul do Brasil, especialmente durante os meses de primavera e outono (alta descarga estudado).

As séries temporais de diferença, são importantes para comparar os valores obtidos entre os cenários. Estes estão com valores negativos ao longo das séries, e podemos considerar como nulos. De forma que, os Pontos ao norte, leste e sul, se apresentaram com variações iguais a zero. As séries possuem maior variância entre os períodos de 01/2015 – 04/2015, 07/2015 – 12/2015. Esses valores de salinidade da superfície também estão representados nas Figuras de salinidade no período de baixa descarga e o período de alta descarga.

Os valores encontrados no *box plot* da Figura 18 e 19, estão na Tabela 4. Nesse caso, os valores de mínimo são os mais interessantes para avaliar a formação de salinidade da pluma. Da mesma forma o período de baixa descarga é mais perceptível de observações. Ao observarmos os valores de mínimos na tabela no período de baixa descarga, temos o Cenário I com os pontos que alcançaram menores valores (Pontos sul e norte). Enquanto no Cenário II, os pontos de mínimo foram os Pontos sul e leste. O Ponto sul se apresenta em comum em ambos os cenários, demonstrando a direção da pluma.

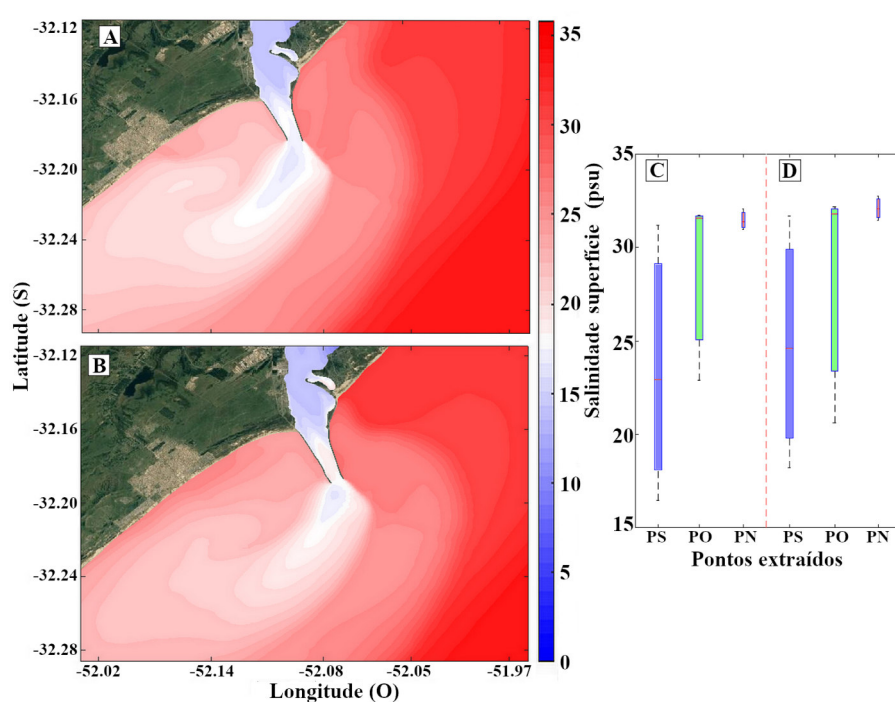


Figura 18: Concentração de salinidade na superfície para o Cenário I (A) e o Cenário II (B) no período de baixa descarga. Diagrama de *box plot* para cada um dos pontos extraídos nos cenários para o Cenário I (C) e o Cenário II (D). Com valores de mínimos e máximos, primeiro e terceiro quartil e mediana do conjunto de valores.

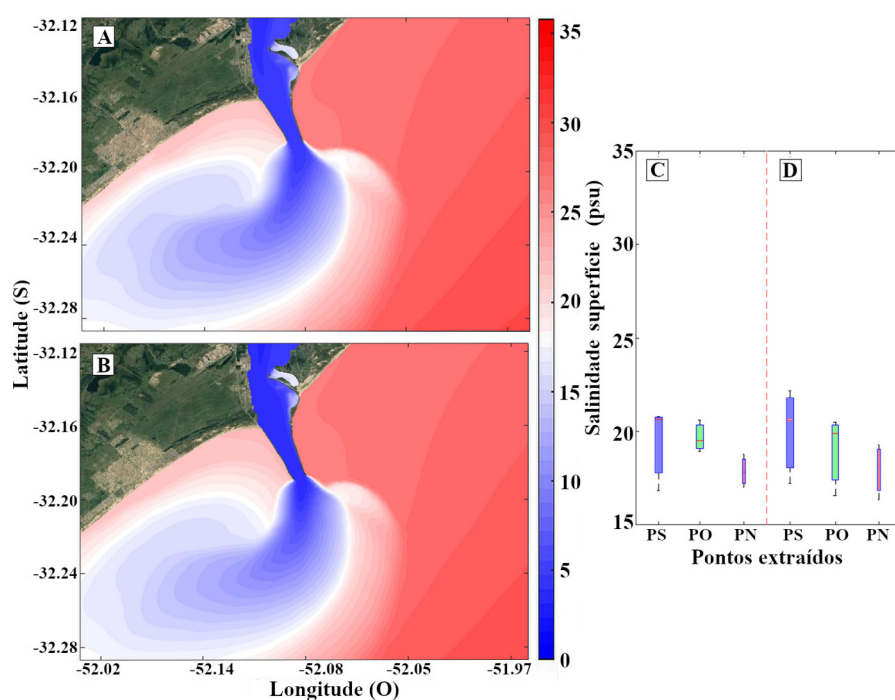


Figura 19: Concentração de salinidade na superfície para o Cenário I (A) e o Cenário II (B) no período de alta descarga. Diagrama de *box plot* para cada um dos pontos extraídos nos cenários para o Cenário I (C) e o Cenário II (D), com valores de mínimos e máximos, primeiro e terceiro quartil e mediana do conjunto de valores.

Com variações secundárias, Cenário I na direção norte e Cenário II na direção leste. Os valores de máximo, são atingidos com o Ponto norte em ambos os cenários. Na alta descarga, há diferença nos pontos mínimos, no Cenário I estão nos Pontos sul e norte, e no Cenário II, nos Pontos leste, norte e os valores de máximo estão no Ponto ao sul, demonstrando que o Cenário II, teve alteração no direcionamento da pluma.

O período de baixa descarga verificado é típico da estação de outono na região e esta descarga continental não se reflete imediatamente na formação da pluma, pois existe um tempo necessário para que esta descarga no norte da lagoa chegue na desembocadura, e esse tempo pode ser variar entre 30 – 180 dias, período que de acordo com Parise [2010], em que há presença de ondas *swell*, oriundo do Pacífico Sul Extratropical penetra no Oceano Atlântico e interferem no clima de ondas da região sul e sudoeste, contribuindo para elevação da superfície, além dos campos de ventos da região.

Tabela 6: Resultados das simulações de estudo de caso para os dados de salinidade superficial nos períodos de estudo

	Pontos		Mínimos	Máximos	Médias
Baixa descarga	CI	PS	16.4	31.1	22.9
		PO	22.9	31.7	31.5
		PN	20.6	32.1	31.7
	CII	PS	18.2	31.6	24.6
		PO	20.6	32.1	31.7
		PN	31.4	32.7	32
Alta descarga	CI	PS	16.8	20.7	20.6
		PO	18.9	20.6	19.5
		PN	17	18.7	17.8
	CII	PS	17.2	22.1	20.6
		PO	16.5	20.5	19.8
		PN	16.3	19.3	18.2

A Lagoa dos Patos é uma lagoa costeira, que há troca constante entre água estuarina e as águas costeiras, mesmo que a morfologia do sistema tenha sido modificada pela construção de

dois molhes da Barra [MOLLERI ET AL., 2010]. Entre eles, as trocas de salinidade ocorrem devido aos gradientes de pressão barotrópicos estabelecidos entre a área do estuário e o oceano adjacente [MOLLER ET AL., 2001]. No Cenário I, a área da pluma de campo próximo é maior em relação ao Cenário II, sendo inversamente proporcional a pressão, demonstra na desembocadura no Cenário II é menor [BALL ET AL., 2012].

O jato possui forma semelhante no período de baixa descarga em ambos os cenários, predominantemente dirigido para a direção sul. A estrutura vertical da pluma costeira da Lagoa dos Patos foi analisada espacial e temporalmente, considerando dois perfis (sul – norte e leste - oeste), conforme as regiões de maior ocorrência da pluma longitudinal e transversalmente aos Molhes da Barra e zona costeira adjacente. Estes perfis foram extraídos a partir dos pontos de análise da seção anterior. O campo vertical médio para o período 1, de salinidade foi calculado para cada um dos perfis para indicar a estrutura dominante para a região durante o período estudado.

O campo vertical médio de salinidade, apresentados nas Figuras 20, 21, 22 e 21. Ao longo da costa indica um padrão de propagação com algum grau de assimetria, indicando a direção de propagação dominante da pluma para o sul, como nas figuras de superfície (Figuras 18 e 19). Na amostra vertical à linha de costa, pode ser observado um alcance médio de cerca de 8.0km em direção ao oceano aberto. Em ambos os casos, a pluma alcança o fundo na região junto à desembocadura da Lagoa dos Patos, em profundidade de até 10m, sendo rapidamente espalhada pelo efeito positivo da fluabilidade.

A Figura 20 A (Cenário I) e B (Cenário II), representa a distribuição vertical da salinidade durante período de baixa descarga, no transecto sul – norte. Em ambos os cenários a salinidade varia entre 15 e 25 psu, e a pluma se desloca em direção ao sul, com maior alcance e espessura no CII. A maior diferença entre os cenários ocorre na região da desembocadura, onde a salinidade é reduzida pela metade no CII, quando comparado ao CI. Na Figura 22, são representados os resultados para o período de alta descarga, nos transectos sul-norte. Novamente a pluma desenvolve em direção ao sul, apresentando uma formação mais evidente no CI, com menor espalhamento e gradiente mais acentuado. No CII, ocorre um maior espalhamento e deslocamento da pluma. Desta forma, são observadas salinidades maiores no entorno

da desembocadura, enquanto ocorre uma redução ao sul.

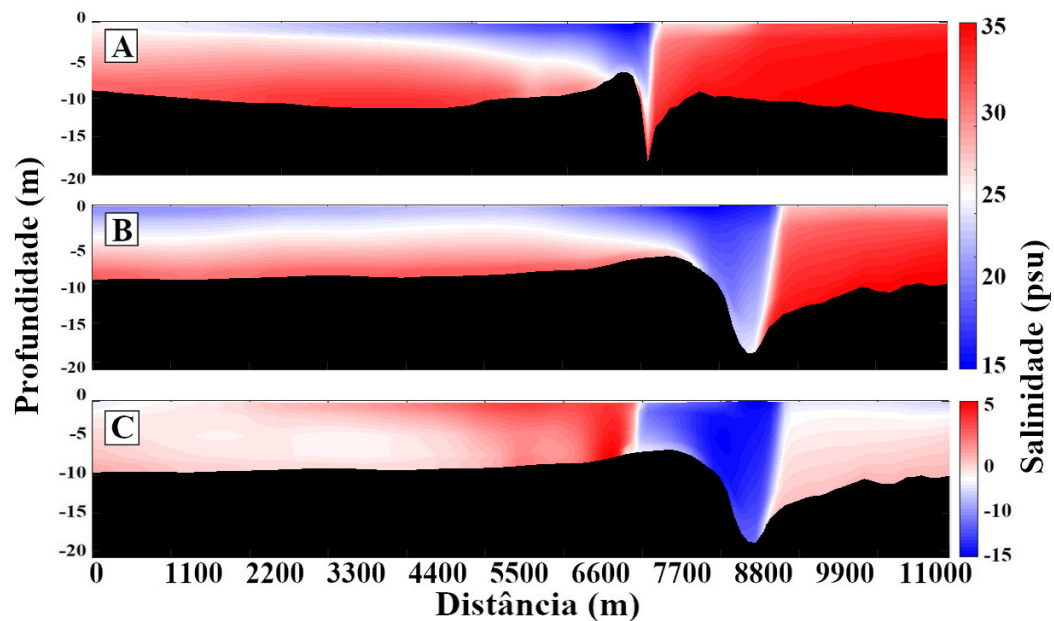


Figura 20: Distribuição vertical da salinidade nos transectos sul – norte, durante período de baixa descarga, para o CI (A) e CII (B). Em C está representada a diferença entre os dois cenários.

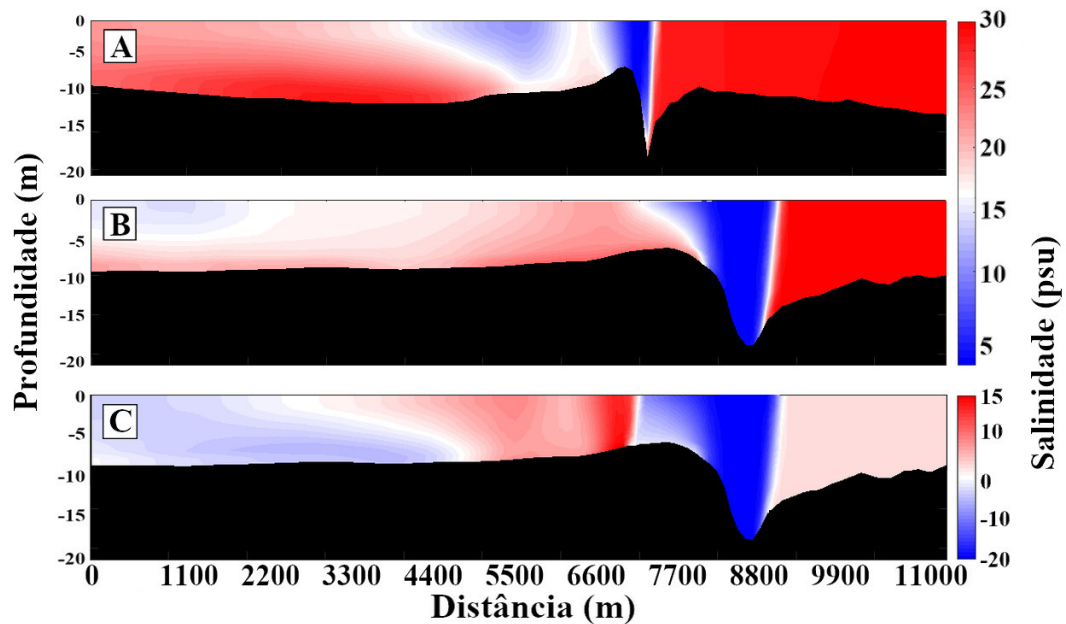


Figura 21: Distribuição vertical da salinidade nos transectos sul – norte, durante período de baixa descarga, para o CI (A) e CII (B). Em C está representada a diferença entre os dois cenários.

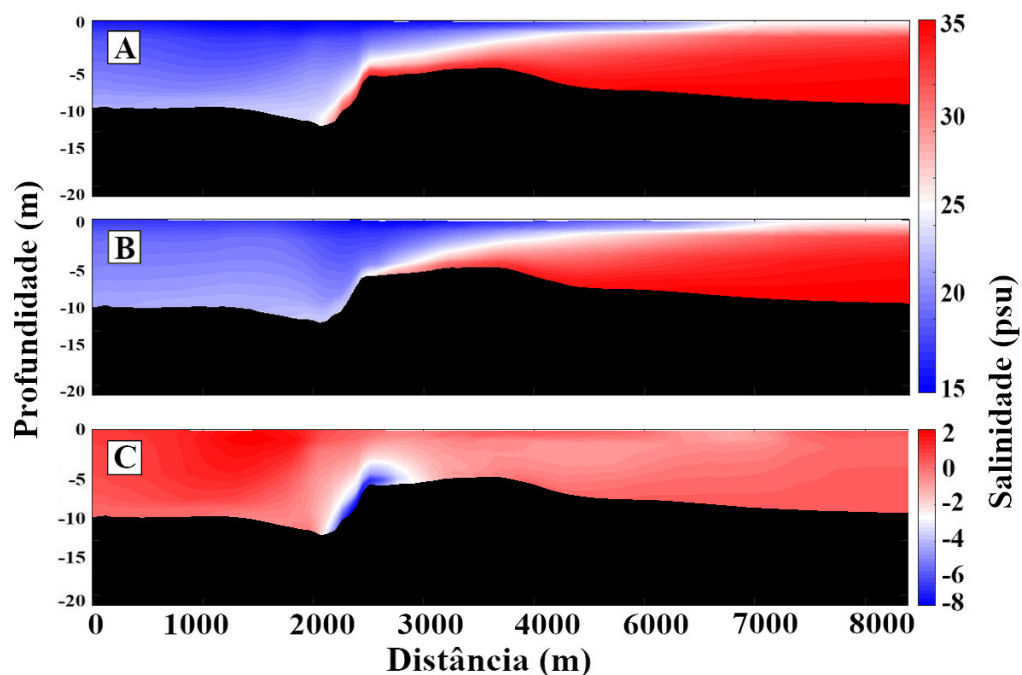


Figura 22: Distribuição vertical da salinidade nos transectos leste - oeste, durante período de alta descarga, para o CI (A) e CII (B). Em C está representada a diferença entre os dois cenários.

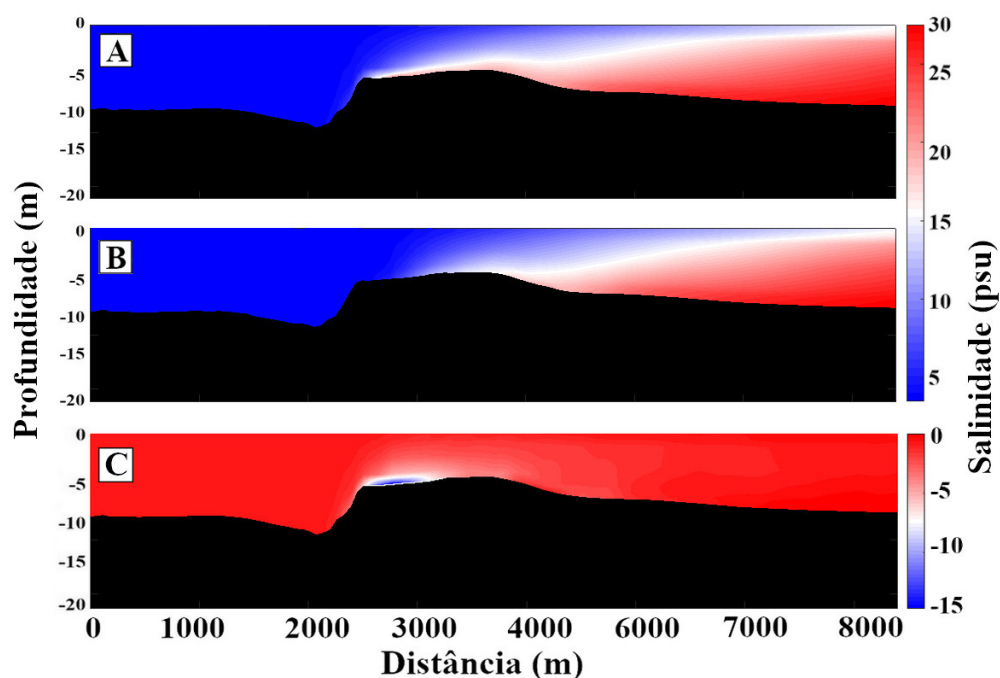


Figura 23: Distribuição vertical da salinidade nos transectos leste - oeste, durante período de alta descarga, para o CI (A) e CII (B). Em C está representada a diferença entre os dois cenários.

A Figura 21 representa a distribuição vertical da salinidade durante período de baixa des-

carga, no transecto leste - oeste. Os valores do CI (Figura 21 A) se apresenta com 15 psu e do CII (Figura 21 B) com valor igual a 25 psu. O alcance da pluma é similar nos dois cenários, enquanto a intrusão de água salina pelo fundo atinge maiores extensões no CI. Na Figura 23, são representados os campos verticais de salinidade para o período de alta descarga, no transecto oeste-leste.

Em ambos os cenários, a salinidade varia entre 5 e 15 psu, com diferença nula. O padrão é similar ao observado no período de baixa descarga, mostrando um alcance da pluma similar no CI e no CII. Os perfis sul-norte, mostram que a extensão da desembocadura teve impacto na direção sul (6600 m), o mesmo acontece com os perfis oeste-leste, com diferença próximo à desembocadura (2200 - 3300 m). A intrusão de água salina pelo fundo é menor que no período de baixa descarga, e ainda mais restrita no CII.

A estrutura da pluma de salinidade vertical observada é também parcialmente estratificada a bem misturada. Möller et al. [2009], afirma que águas com salinidade menores que 33.5 psu nesta região da plataforma continental podem ser consideradas águas influenciadas pela pluma do rio *Plata*, que no inverno, a pluma costeira da Lagoa dos Patos pode estar embebida nas águas da pluma do rio *Plata*. Já águas com salinidade menores que 31 psu encontradas nas adjacências, foram consideradas neste trabalho como associadas à influência direta da descarga Lagoa dos Patos, em consonância com [MARQUES ET AL., 2010A].

Marques et al. [2010a] também definiram que o padrão médio da pluma da Lagoa dos Patos tem comportamento subcrítico, baseando-se nas classificações de [CHAO, 1988]. Não é possível identificar nitidamente uma grande diferença entre a protuberância formada próximo da região do canal de acesso e a região da corrente costeira localizada ao norte. Valores menores de salinidades são encontradas ao sul do canal de acesso, indicando que esta pluma, em média, apresenta um desvio para o sul da desembocadura.

Isso se dá pela descarga constante com salinidade quase nula, mostrando a predominância da água doce, como mencionado por [ASMUS ET AL., 2006]. Os autores observaram que a salinidade superficial e de fundo é dominada por água doce no período do outono, característico de baixas descargas, como a baixa descarga. Já na alta descarga, a rota da pluma é dirigida integralmente para o sudoeste em ambos os cenários. Avaliando os valores dos transectos,

podemos afirmar que a alta descarga apresenta uma pluma de baixa salinidade e que maior alcance no sentido sudoeste e no baixa descarga a pluma é mais salina e com menor alcance.

A posição dominante da pluma costeira da Lagoa dos Patos é a sudoeste da desembocadura dos molhes, com ordem de grandeza de suas escalas espaciais são 10^0 . Enquanto as regiões onde podemos esperar uma influência direta da pluma para a dinâmica do ecossistema costeiro adjacente é ao leste e sul. Durante o período de baixa descarga, foi possível observar uma distribuição difusa para o sentido norte. Essa migração descontínua pode ser associada ao efeito do vento, que se torna mais relevante em períodos de baixa descarga. Além disso, as figuras de diferença se serie temporais, superfície e vertical, podem apresentar a influência do estreitamento dos Molhes da Barra na pluma, de forma que os valores para o cenário II, se apresentou maiores índices de psu em relação ao Cenário I.

3.2 Formação da pluma de sedimento

A Lagoa dos Patos transporta altas concentrações de sedimentos em suspensão para o sul do Brasil plataforma continental interna, causando vários problemas, tais como fluxos de lama e depósitos de lama ao longo da costa, afetando diretamente a economia regional [CALLIARI ET AL., 2009]. O sedimento em suspensão é o terceiro traçador ativo considerado no modelo.

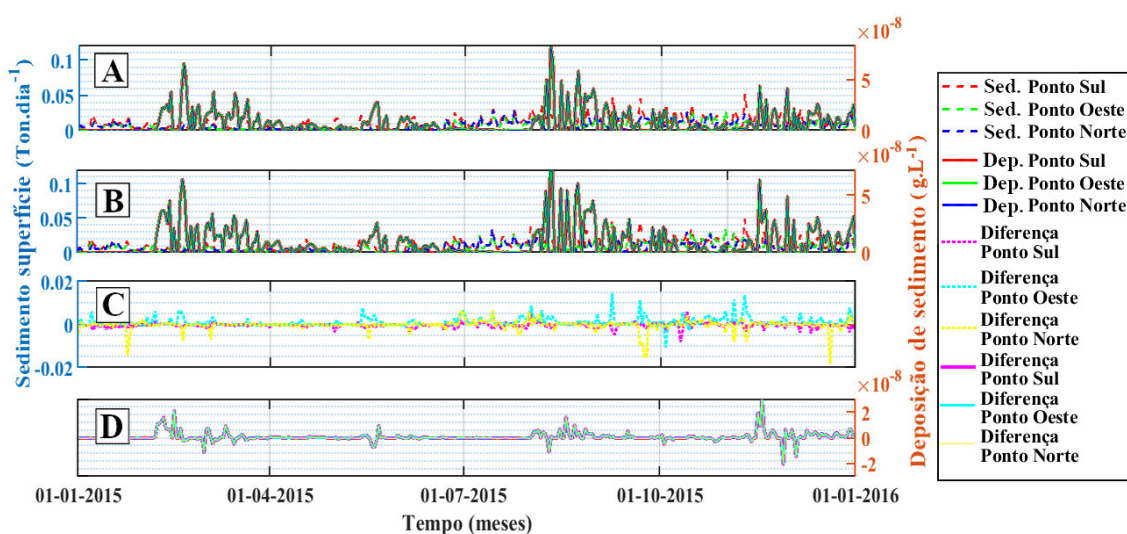


Figura 24: Concentração de sedimento em suspensão na superfície e fluxo de deposição de sedimento dos pontos extraídos, para Cenário I (A) e Cenário II (B); diferenças entre as séries, para sedimento em suspensão (C) e para o fluxo de deposição de sedimentos (D).

A Figura 24, traz séries temporais dos dois cenários com os dados de sedimento em suspensão com o fluxo de deposição de sedimentos. O sedimento suspenso ficou na média de 1.14×10^{-2} Ton/dia, se mostrando inversamente proporcionais a salinidade (Figura 18). Dessa forma, mesmo a descarga sendo o principal componente de transporte, a velocidade de corrente (Figuras 36, 37) também contribuiu para a dinâmica da pluma.

Os Pontos ao leste e ao sul se destacam na baixa descarga e alta descarga em ambos os cenários, sendo que no Cenário I esse valor é superior que em Cenário II. Quando observamos os valores de diferença para na baixa descarga, eles são iguais, e no alta descarga, o ponto ao leste, apresenta maior variação de resultados. Quanto ao fluxo de deposição de sedimentos, os valores se apresentam iguais tanto para na baixa descarga quanto para na alta descarga, para ambos os cenários, sendo que na baixa descarga, há valores a serem considerados sendo relacionado aos sedimentos de suspensão, na baixa descarga, eles são inversamente proporcionais.

Tabela 7: Resultados das simulações de estudo de caso para os dados de sedimento de suspensão e de fluxo de deposição nos períodos de estudo

		Sedimento em suspensão (Ton.dia ⁻¹)		FDS (kg.L ⁻¹)	
		Baixa	Alta	Baixa	Alta
		descarga	descarga	descarga	descarga
Cenário I	PS	1.62×10^{-05}	2.48×10^{-05}	9.00×10^{-09}	0
	PO	1.37×10^{-05}	1.34×10^{-05}	9.00×10^{-09}	0
	PN	1.13×10^{-05}	1.13×10^{-05}	9.00×10^{-09}	0
CII	PS	1.51×10^{-05}	1.69×10^{-05}	9.20×10^{-09}	0
	PO	1.63×10^{-05}	1.38×10^{-05}	9.2×10^{-09}	0
	PN	1.25×10^{-05}	1.19×10^{-05}	9.2×10^{-09}	0
CII-CI	PS	1.04×10^{-05}	7.90×10^{-06}	1.80×10^{-11}	0
	PO	1.04×10^{-05}	3.68×10^{-05}	1.80×10^{-11}	0
	PN	1.04×10^{-05}	0	1.80×10^{-11}	0

As figuras de superfície para a variável de sedimento em suspensão (Figura 25 e 26), ajudam com a observação da área ocupada por essa pluma de sedimento. Dessa forma, foi elaborado a Figura 25, no período de baixa descarga, onde a pluma de sedimento em suspensão

se desloca continuamente ao longo do canal para o oceano, podendo alcançar a linha costeira, próximo os molhes. Já a Figura 26, no período de alta descarga, a pluma de sedimento em suspensão tem uma forte frente de pluma em formação em ambos os cenários tendo direção definida ao sudoeste.

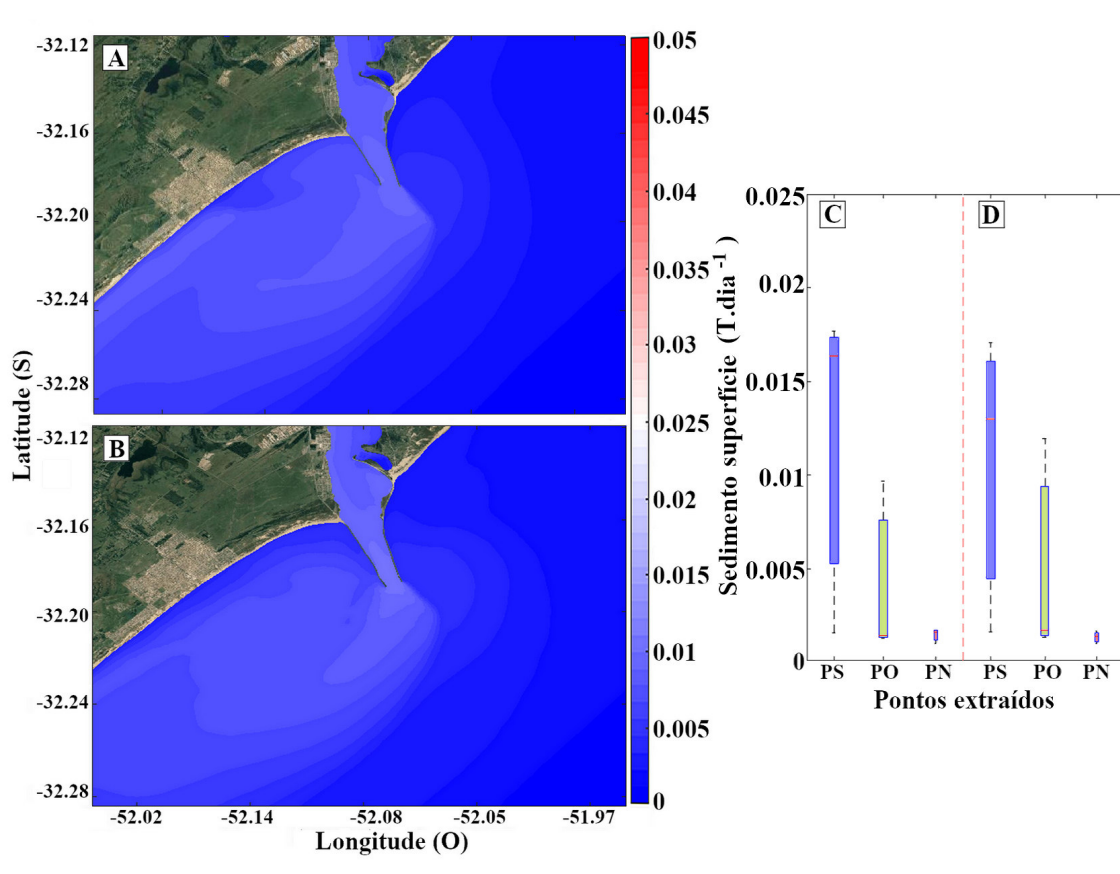


Figura 25: Concentração de sedimento em suspensão para o Cenário I (A) e o Cenário II (B) no período de baixa descarga. Diagrama de *box plot* para cada um dos pontos extraídos para o Cenário I (C) e o Cenário II (D). Com valores de mínimos e máximos, primeiro e terceiro quartil e mediana do conjunto de valores.

Na alta descarga e na Figura 26), temos um jato com valores entre 2.5×10^{-2} e 5.0×10^{-5} Ton/dia com o diagrama (Figura 26 C e D). Mostrando que Cenário II tem mais efeito na desembocadura no momento da descarga, nos pontos extraídos. É importante destacar que a resposta das águas do sedimento em suspensão e salinidade, à descarga do rio não é imediata, e está relacionada com o tempo de residência da Lagoa dos Patos [FERNANDES ET AL., 2002].

Com a pluma de salinidade superficial, a pluma de sedimento, importante para determinar os fluxos fluviais de deposição e erosão, teve formação similar, tendo, no entanto, maior contribuição nas direções leste e nordeste, próximo à desembocadura (Figura 26). Ou seja, a saída

da desembocadura é onde acontece o maior número de sedimento em suspensão, independente do cenário. As variações de quantidade de sedimentos em suspensão, ocorreram nos pontos ao sul, que sofre alteração de 1.04×10^{-5} e para 7.90×10^{-6} .

Além do ponto leste, que passa de 1.04×10^{-5} para 3.68×10^{-5} . Que se estendeu cerca de 8km da costa de forma contínua em direção sudoeste até se dispersar na plataforma (Figuras 22, 23, 28 e 28). Esse processo de aumento sedimentar nas regiões oeste e norte, com a alta descarga acontece devido o prolongamento dos molhes [RIJN, 2005].

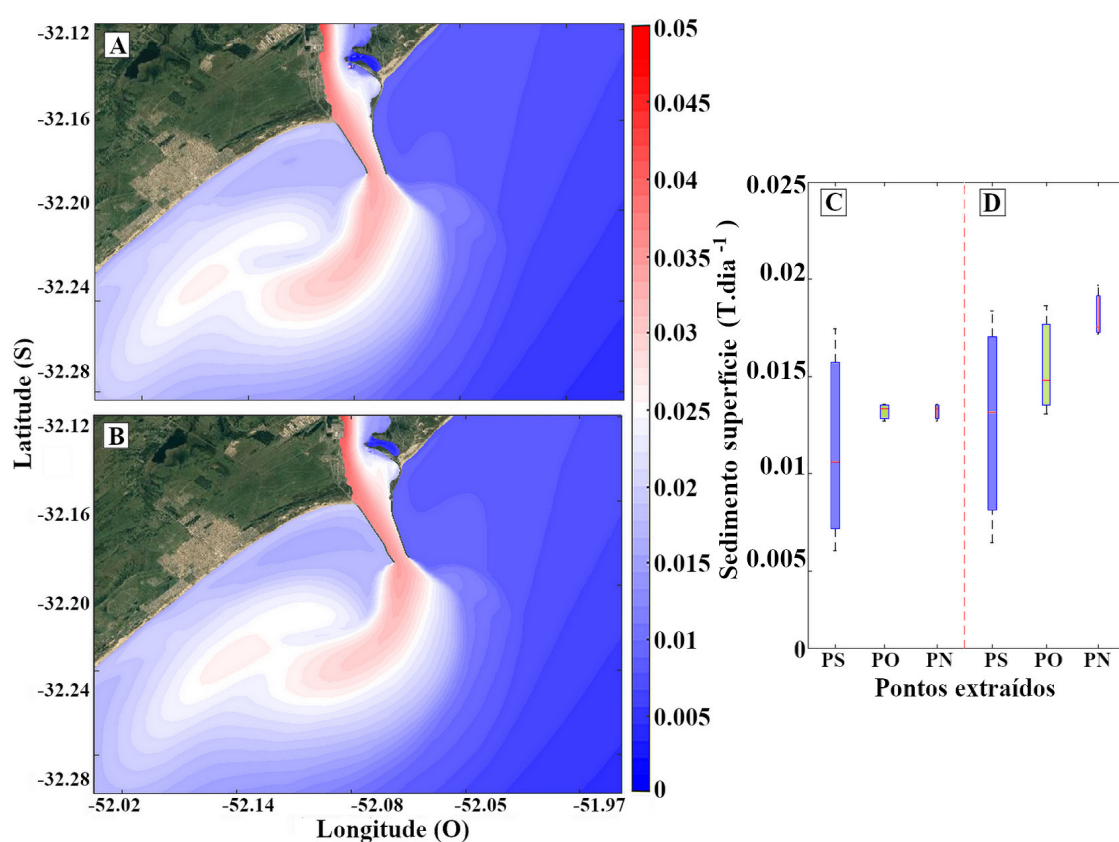


Figura 26: Concentração de sedimento na superfície para o Cenário I (A) e o Cenário II (B) no período de alta descarga. Diagrama de *box plot* para cada um dos pontos extraídos nos cenários Para o Cenário I (C) e o Cenário II (D). Com valores de mínimos e máximos, primeiro e terceiro quartil e mediana do conjunto de valores.

A origem da formação do sedimento em suspensão, pode-se dizer que o mesmo da salinidade, a descarga. Na Lagoa dos Patos, há uma tendência a propagação da pluma para o sudoeste da desembocadura, como observado nas figuras anteriores. A pluma alcança o fundo nas regiões mais próximas da zona costeira, principalmente a sudoeste da desembocadura. Este comportamento do material em suspensão que se relaciona com as regiões onde o fluxo da deposição de

sedimento (Figura 24) pode indicar relação com a circulação da região.

Enquanto sedimentos mais grosseiros em suspensão tendem a se depositar em regiões de baixa hidrodinâmica na lagoa, sedimentos finos em suspensão são transportados para mais longe em direção à costa [CALLIARI ET AL., 2009]. As crescentes concentrações de sedimentos em suspensão são de preocupação ambiental, pois este material está relacionado ao assoreamento do porto Silva et al. [2015] e alimenta os depósitos de lama ao largo da praia do Cassino [CALLIARI ET AL., 1998]. O período de alta descarga é o mais perceptível quanto as alterações dos cenários. A janela de variação de máximos e mínimos nos pontos, principalmente nos Pontos Leste e Sul, ou seja, a alteração na desembocadura tem impacto no direcionamento do jato.

A pluma se apresenta na direção norte para o sul, em que no Cenário I, a Figura 27 A, tem uma alteração de gradiente no eixo x, em cerca de 6600 m até 2200 m, mantendo-se continua, no bojo dos molhes como acontece na pluma de salinidade. Observamos uma divisão de sedimentos superficiais em 3300 m do perfil e possui um gradiente em torno de 6×10^{-6} a $11 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^{-3}$. Comparando ao Cenário II, a Figura 27 B, acontece uma forma uniforme entre o eixo x, em 7700 m a 0 m. E a maior diferença aparece no interior dos molhes, entre o eixo x de 6600 m – 8800 m, variando entre 6×10^{-3} e $10 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^{-3}$.

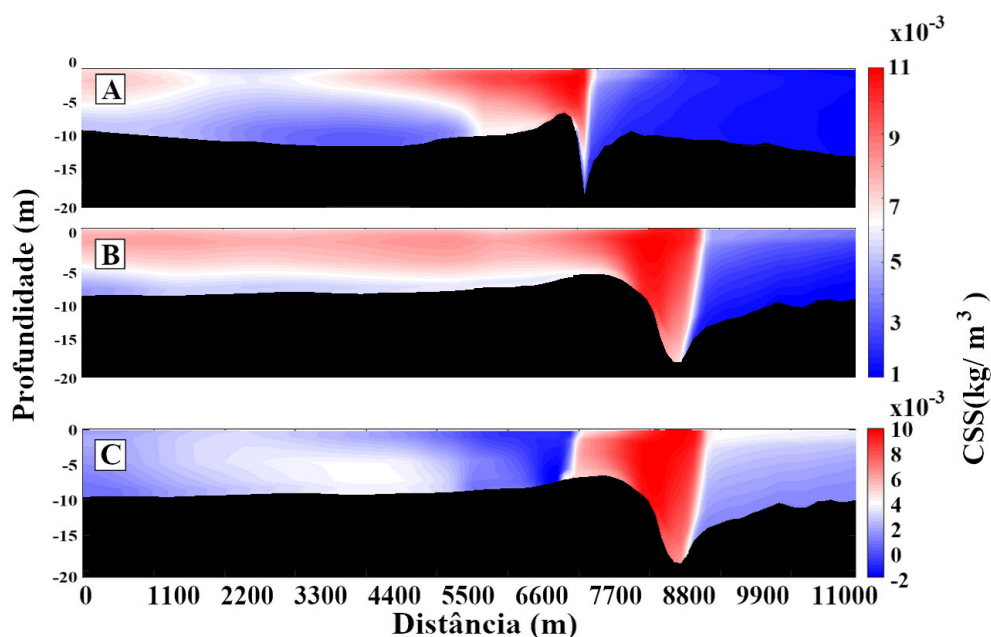


Figura 27: Perfis de sedimento suspenso na superfície no sentido sul – norte, no período de baixa descarga. Em (A) é possível observar o resultado para o Cenário I, em (B) para o Cenário II e em (C) a diferença entre os dois cenários.

Nas Figuras 28 e 30, os transectos extraídos no período de alta descarga, o Cenário I, ocorre um gradiente de sedimento se dispersando entre 7700 e 4400 m. Já no Cenário II, a pluma sedimentar se concentra na saída dos molhes e se dispersa entre 5500 a 0. Na diferença entre os cenários (Figura 28 C), se mostra semelhante à Figura 28 B, ou seja, o Cenário II tem maior alteração de gradiente em relação ao Cenário I.

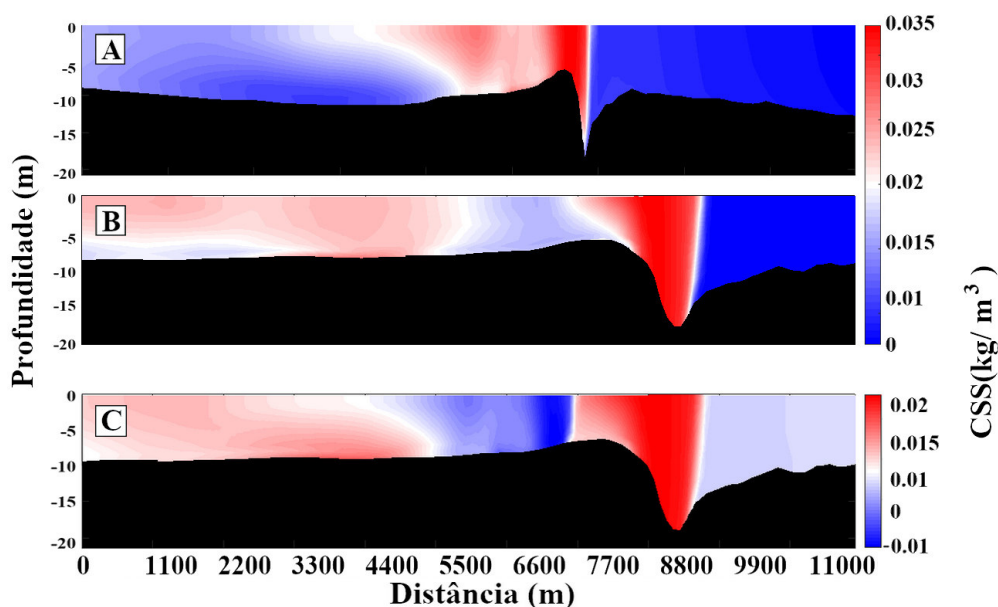


Figura 28: Perfis de sedimento suspenso na superfície no sentido sul – norte, no período de alta descarga. Em (A) é possível observar o resultado para o Cenário I, em (B) para o Cenário II e em (C) a diferença entre os dois cenários.

Os perfis sul-norte, se mostraram com diferentes formações nos dois períodos, no Cenário II, apresenta uma continuidade de sedimento suspenso no sentido sul. Observando a Figura 28, que considera o período de alta descarga, a Figura 28 A, o gradiente de sedimento superficial se concentra na desembocadura dos molhes da Barra com variações entre 2.0×10^{-2} e 3.5×10^{-2} .

Na Figura 28 B, nos observamos uma quebra de gradiente de pluma de sedimento superficial na distância de 0 a 5500, que podemos associar ao jato de descarga que possui mais força nesse caso. Já a Figura 28 C, as diferenças presentes no bojo e na distância de 0 a 4400 m se destacam, seguindo o impacto da presença dos molhes da Barra no Cenário II (Figura 28 B).

Encontramos formação parecidas em ambos os cenários (Figura oeste-leste de baixa descarga A e B, e a diferença dos cenários (Figura 29 C.), o gradiente de pluma sedimentar se

localiza próximo à desembocadura no eixo x, em cerca de 2000 e 3000 m. Na Figura 30), podemos afirmar que a formação da pluma de sedimentos em suspensão se comporta semelhantemente em ambos os Cenários.

Na Figura 29, o gradiente se concentra no sentido leste para ambos os cenários (Figura 29 A e B), variando entre 7 e 12 kg/m^{-3} . Na Figura 29 C, a diferença se concentra próximo ao bojo, do lado leste (2000 – 3000 m), assim como na salinidade superficial, devido à presença do prolongamento dos molhes no Cenário II (Figura 29 B).

O Cenário II tem maior amplitude em relação ao Cenário I (Figuras 30 A e B). Com variação entre 2000 e 3000 m (Figura 30 C), devido à extensão dos molhes da Barra. Sendo a descarga da Lagoa dos Patos e a média da velocidade de corrente, duas variáveis iniciais importantes para a formação da pluma. Nos perfis, oeste — leste, a mesma formação de pluma em ambos os períodos, com diferença apenas na desembocadura dos molhes. Esse processo de aumento sedimentar nas regiões oeste e norte, com a alta descarga acontece devido o prolongamento dos molhes [RIJN, 2005].

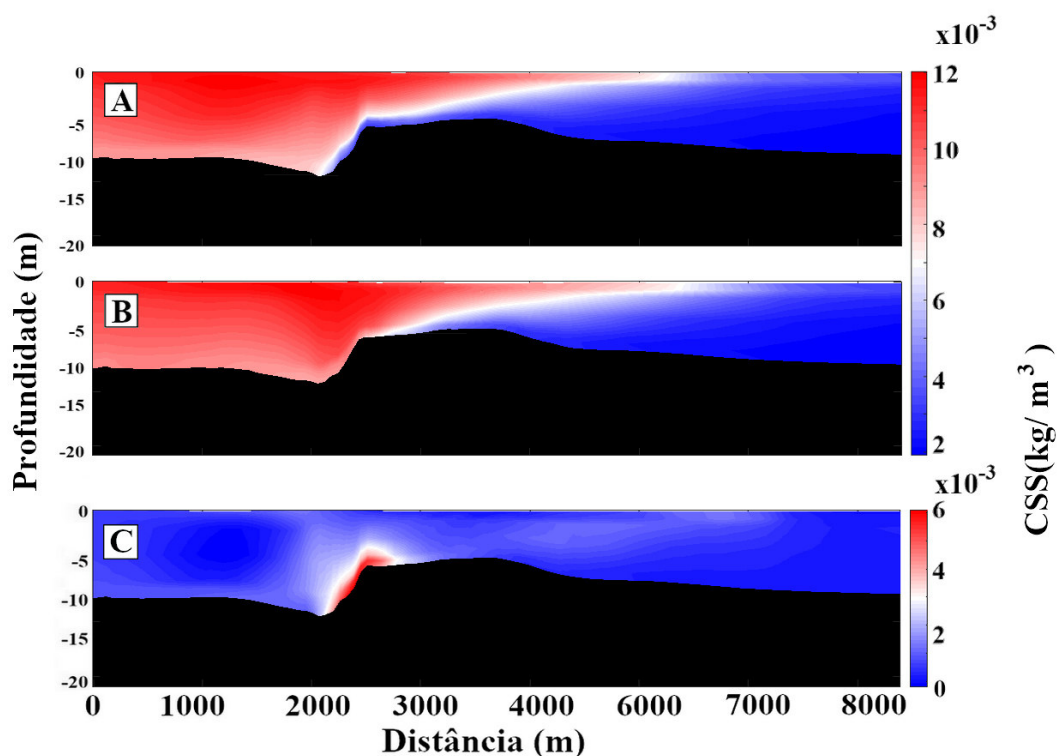


Figura 29: Perfis de sedimento suspenso na superfície no sentido leste — leste, no período de baixa descarga. Em (A) é possível observar o resultado para o Cenário I, em (B) para o Cenário II e em (C) a diferença entre os dois cenários.

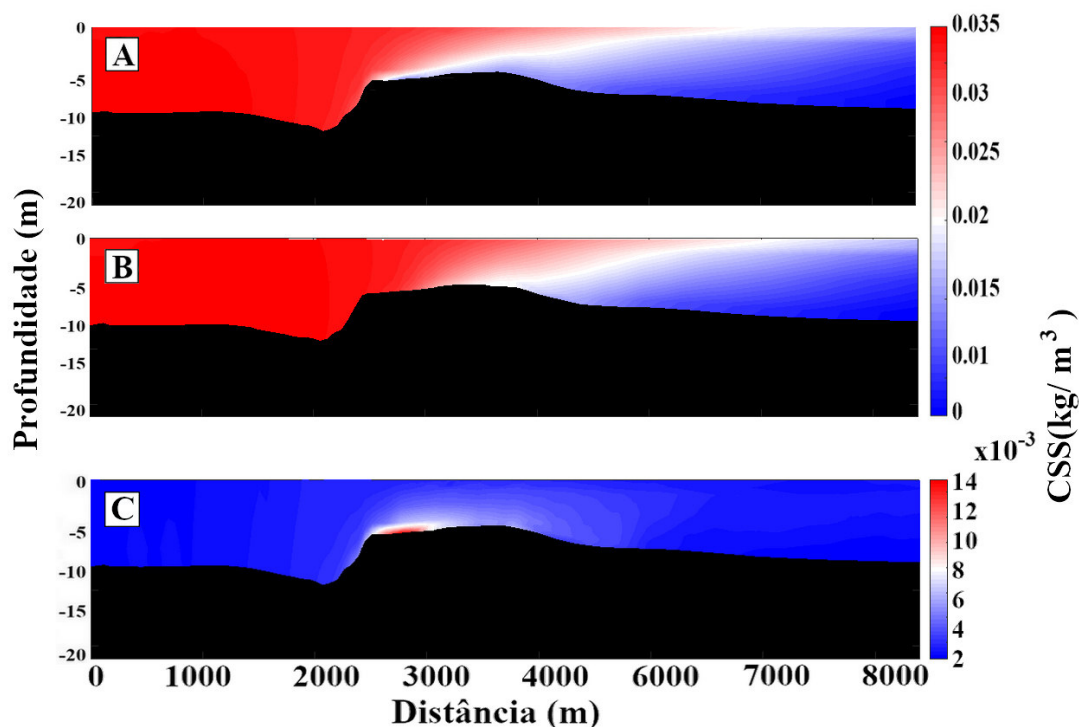


Figura 30: Perfis de sedimento suspenso na superfície no sentido sul – norte, no período de alta descarga. Em (A) podemos observar o resultado para o Cenário I, em (B) para o Cenário II e em (C) a diferença entre os dois cenários.

Em relação com média da velocidade de corrente, os pontos sul e leste, tem valores positivos em ambos os cenários. Em ambos os cenários, tem baixa influencia de velocidade na região norte da desembocadura. O que proporciona ao processo de advecção da pluma [MARQUES ET AL., 2010C].

As correlações de velocidade e descarga se apresentaram positivas nos Pontos sul e oeste, enquanto nos Pontos norte, ela não correspondeu a velocidade. A região próximo à desembocadura, há advecção vertical (zona de convergência de fluxo), a porção nordeste mostra-se com baixa deformação e advecção transversal à costa e a sudoeste da desembocadura é controlada pela deformação e advecção ao longo da costa e a advecção transversal a zona costeira [MARQUES ET AL., 2010C].

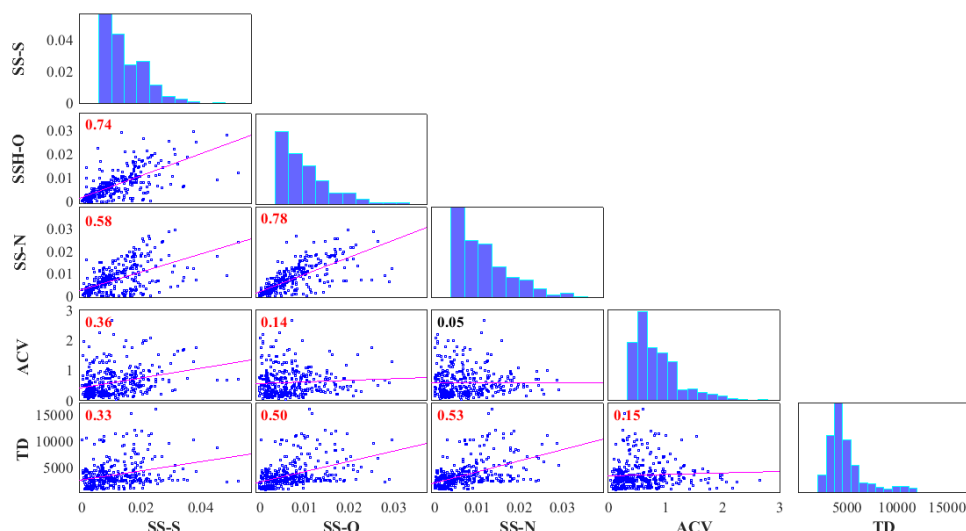


Figura 31: No eixo x, é apresentada a concentração de sedimento de superfície (SS) nos pontos extraídos (SS-S, SS-L e SS-N), a média da velocidade de corrente (ACV) e a descarga total (TD), para o Cenário I. A mesma sequência se repete no eixo y, inversamente.

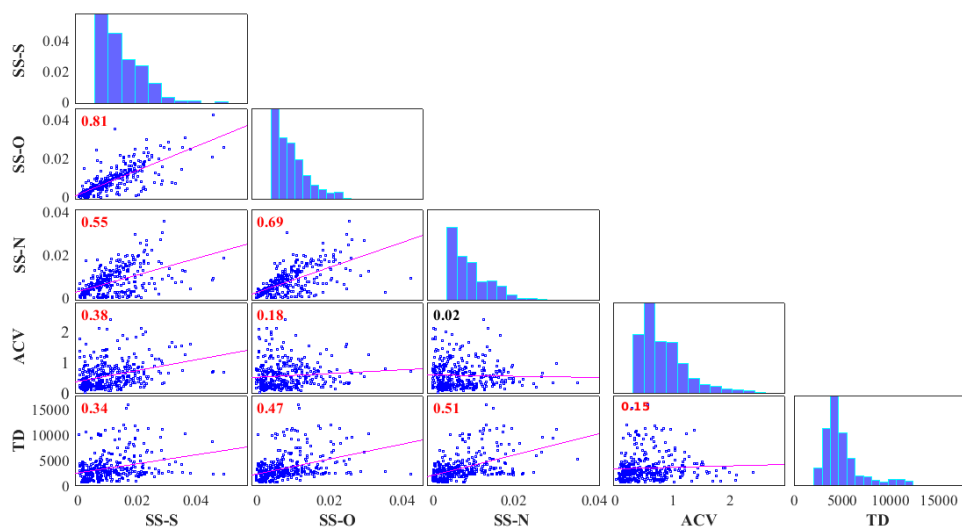


Figura 32: No eixo x, é apresentada a concentração de sedimento de superfície (SS) nos pontos extraídos (SS-S, SS-L e SS-N), a média da velocidade de corrente (ACV) e a descarga total (TD), para o Cenário II. A mesma sequência se repete no eixo y, inversamente.

Aplicado a correlação de Sperman com o sedimento em suspensão, como apresenta as figuras acima. Conforme a propriedade aplicada, os valores consideráveis se apresentam na cor vermelha. Os resultados do modelo para o Cenário I, sobre sedimento em suspensão (SS-S, SS-L e SS-N), tiveram boa correlação entre si, com 0.74, 0.58 e 0.78. Os pontos apresentam boa relação com a descarga total (TD), com 0.33, 0.50 e 0.53.

[MARQUES ET AL., 2010C] completa que, eventos de deposição de menor intensidade ocorrem também durante os períodos de menor disponibilidade de sedimentos. Estes podem estar associados a advecção intermitente deste material para a região mais ao sul durante condições favoráveis e mais duradouras de ventos de quadrante norte. Que acaba por preceder as mudanças de direção nos ventos associados a condições de baixas intensidades de corrente (baixa descarga).

3.3 Comportamento e destino da pluma

As forçantes de movimento como, efeito da rotação da Terra, marés, ação local e remota dos ventos, são responsáveis pelo comportamento e destino das plumas costeiras. Na pluma da Lagoa dos Patos, destaca-se a influência da descarga e da variabilidade do vento [CALLIARI ET AL., 2009; MARQUES ET AL., 2010A; FERNANDES ET AL., 2021].

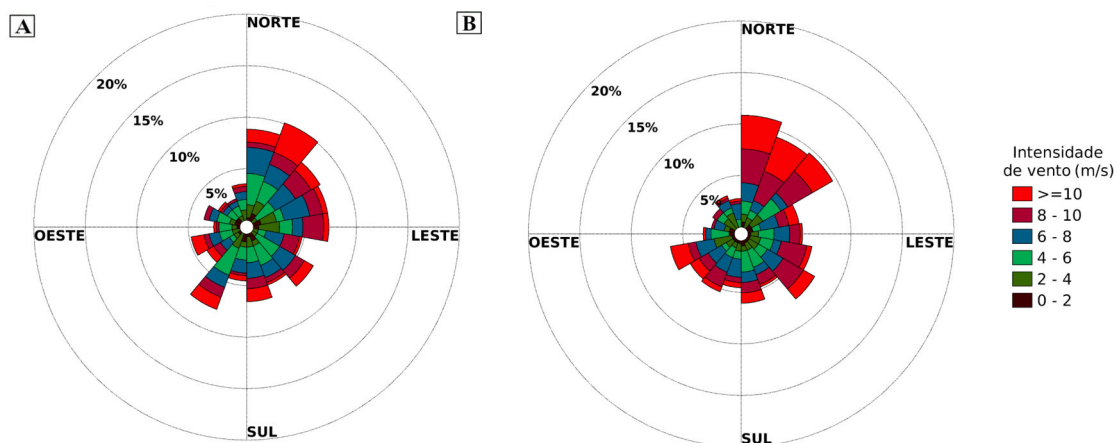


Figura 33: Rosas-dos-ventos das correntes de ventos do período de baixa descarga (A) e período de alta descarga (B).

Visto isto, extraiu-se a variação dos ventos para os três dias observados de cada período propostos para o estudo, apresentada pela rosas-dos-ventos (Figura 33. Na Figura, em A, esta a média dos dias para o período de baixa descarga (30/03/2015 – 01/04/2015) em B, o resultado para o período de alta descarga (06/10/2015 – 07/10/2015).

Durante os períodos, a baixa descarga e o vento controlam a dinâmica da Lagoa dos Patos, permitindo o transporte de água doce pela plataforma. A pluma em ambos os períodos se apresentou impulsionada para o sul, com algumas peculiaridades na desembocadura, devia as

alterações existentes nas figuras de salinidade e representação da velocidade. Mesmo a descarga do rio estando á abaixo ou próxima da média, os ventos são o principal mecanismo de força sobre a Lagoa dos Patos [MOLLER ET AL., 2001].

Os ventos de nordeste são dominantes durante todo o ano [MOLLER ET AL., 2001]. A primavera e o verão austral, cobrem o período de outubro a março, períodos extraídos. A variação dos ventos no período de baixa descarga, tem um comportamento semelhante durante os dias com ventos ao nordeste e sudoeste. Enquanto no período de alta descarga, há uma variação de intensidade diária dos ventos ao nordeste (10 – 15%), ambas as amostras podem espelhar o comportamento da pluma da Lagoa dos Patos. Ao observar elevação da superfície livre para assistir à pluma e seu processo de mistura, induzido pelas marés, a intrusão dos ventos, são as figuras de superfície e as avaliações *box plot*, nas figuras acima.

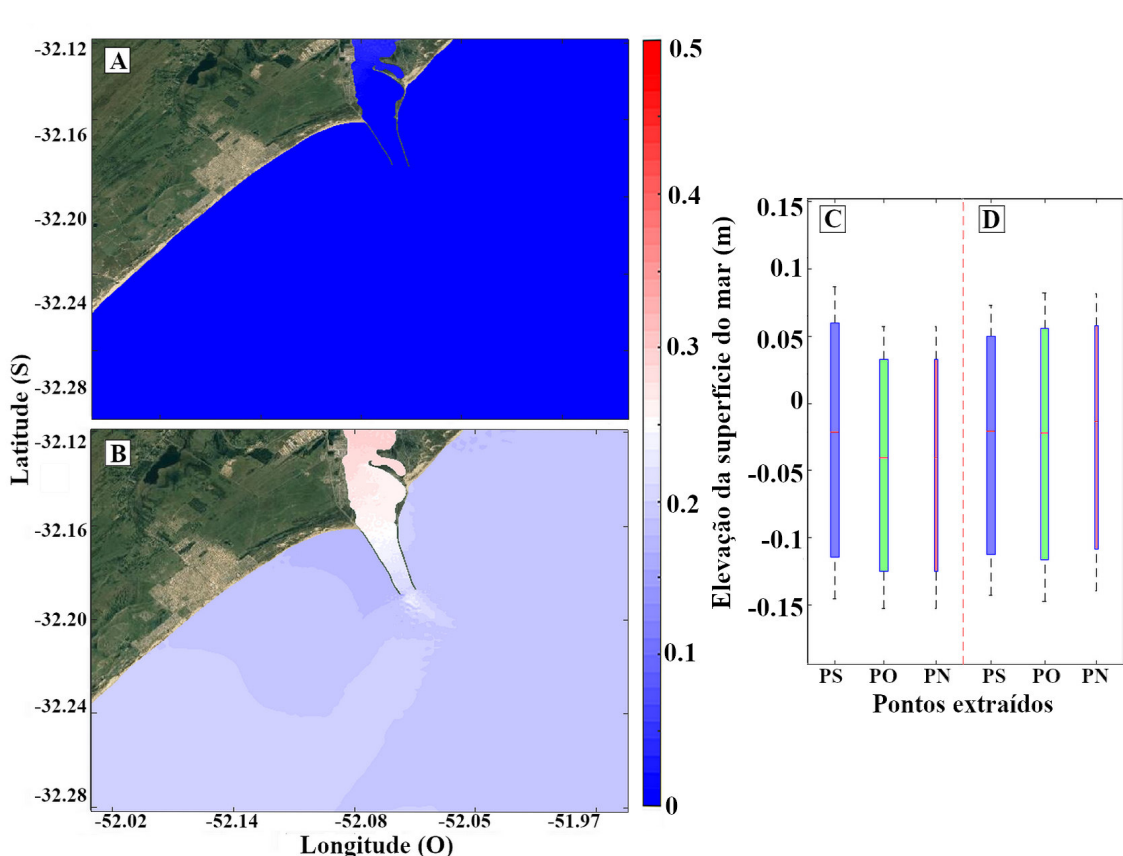


Figura 34: Média da elevação da superfície do mar para o Cenário I (A) e o Cenário II (B) no período de baixa descarga. Diagrama *box plot* para cada um dos pontos extraídos no Cenário I (C) e no Cenário II (D), com valores mínimos e máximos, primeiro e terceiro quartil e mediana do conjunto de valores (baixa descarga).

A Figura no Período de baixa descarga, representa o período de baixa descarga para os dois

cenários, e que devido à baixa descarga o Cenário I (Figura 34 A) tem sua média de elevação próximo a zero e ficou visível somente através das diferenças apresentadas no *box plot*, variando entre nos Pontos sul e norte entre $(0.05 \times 10^{-2}$ e -1.50×10^{-2}) m. Enquanto no Cenário II (B), para Cenário II, a média do gradiente de se apresenta baixo, a cerca de 1.0×10^{-1} e 2.5×10^{-1} m. Assim, o Cenário II, tem variações visíveis na figura de superfície.

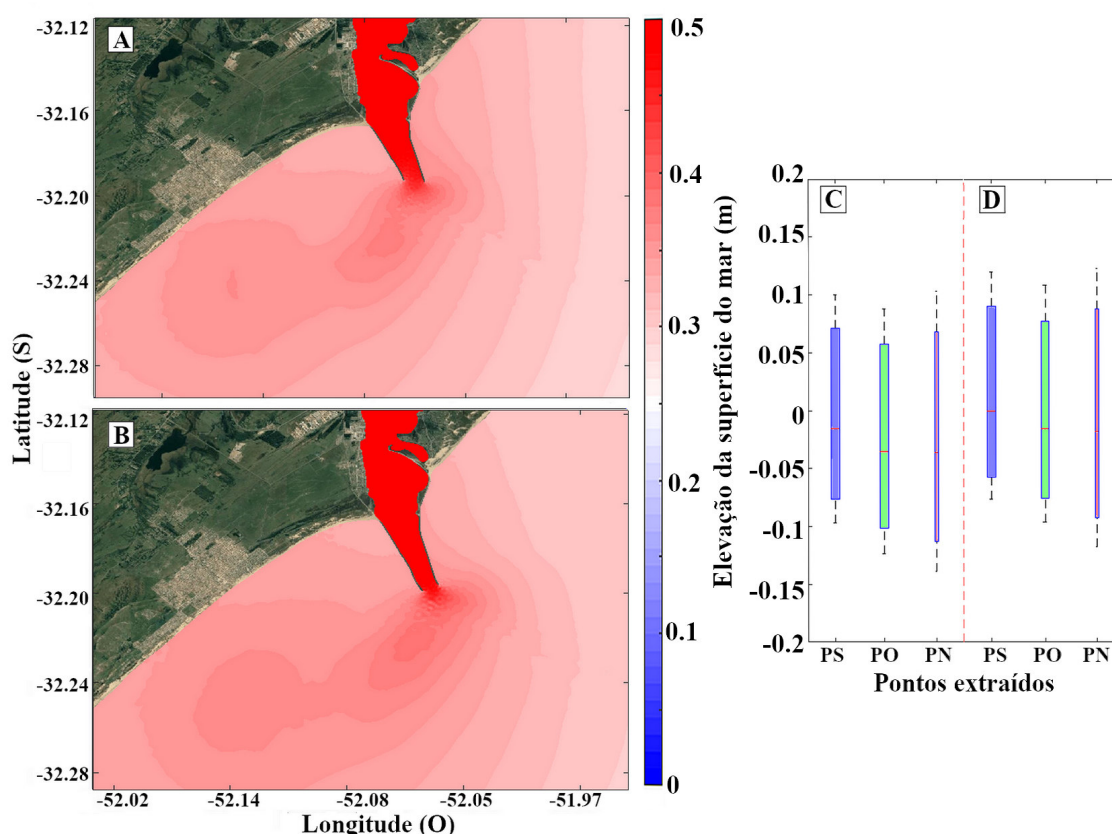


Figura 35: Média da elevação da superfície do mar para o Cenário I (A) e o Cenário II (B) no período de alta descarga. Diagrama *box plot* para cada um dos pontos extraídos no Cenário I (C) e no Cenário II (D), com valores mínimos e máximos, primeiro e terceiro quartil e mediana do conjunto de valores (alta descarga).

Na Figura 35, a alta descarga faz com que a elevação do nível do mar na superfície tenha formas semelhantes na desembocadura, porém se diferencia no jato que se apresenta na pluma de campo distante, tanto no sentido nordeste dos molhes, quanto no sentido predominante ao sudoeste. Refletindo sobre o *box plot* (D) para o Cenário II, que possuem maiores quartis em relação à *box plot* (C), dos pontos extraídos.

No estudo de Fernandes et al. [2002], os autores analisaram o ENOS na entrada da Lagoa dos Patos, no ano de 1998. A alta descarga da lagoa somada à elevação da superfície e em função

da força dos ventos remotos, produziram grandes plumas de água doce no oceano costeiro adjacente, e determinaram o tempo de residência na lagoa, e que resulta no destino da pluma na plataforma, com seus ciclos de velocidade e descarga. Contudo, não foi possível determinar se o mesmo ocorreu em outros anos de ENSO.

Os autores Silva et al. [2015]; Bitencourt et al. [2020] complementaram, que ondas e ventos afetam diretamente hidrodinâmica em sistemas costeiros, e com o aumento da precipitação na bacia de drenagem há um aumento das concentrações de matéria particulada suspensa transportada pela descarga continental em direção à costa. Processo que ocorre naturalmente na região antes mesmo da construção dos molhes.

A região próxima ao campo de qualquer descarga superficial flutuante em corpos d'água com condições geométricas e de fluxo ambiente variáveis é frequentemente caracterizada por movimentos significativos do tipo jato que afetam a mistura das substâncias descarregadas. Podemos admitir haver contribuições de deformação transversal a costa é na região do campo próximo, com contribuições da velocidade média ao longo da vertical influenciam consideravelmente a dinâmica da região nas figuras a baixo:

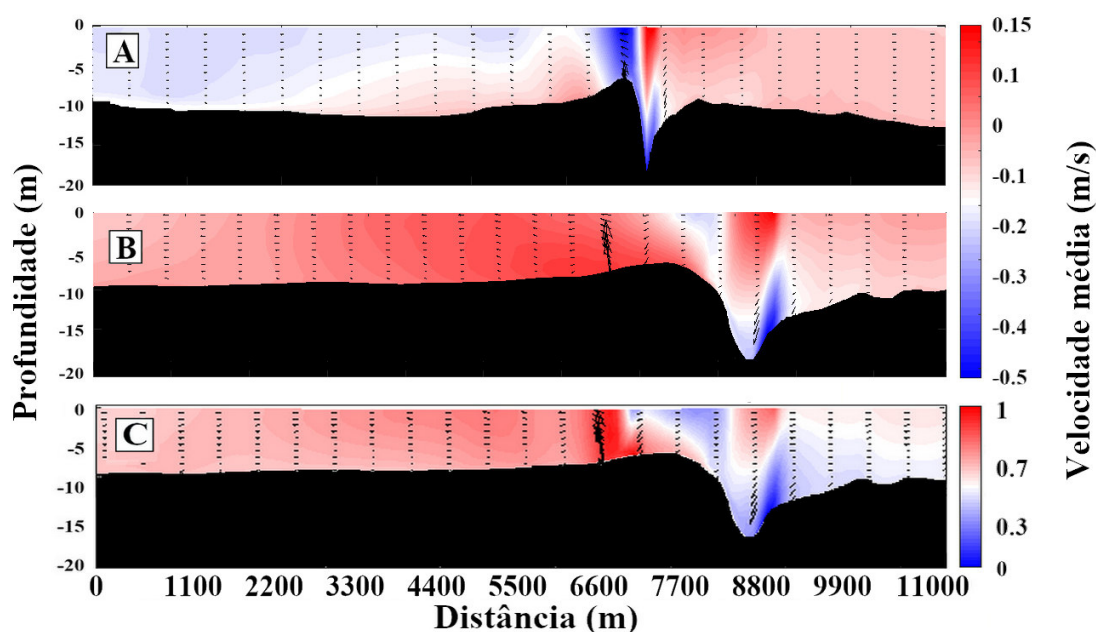


Figura 36: Perfis de velocidade média no sentido sul – norte no período de baixa descarga. Em (A) podemos observar o resultado para o Cenário I, em (B) para o Cenário II e em (C) a diferença entre os dois cenários.

A observação da velocidade média no ambiente de estudo poderá auxiliar na análise da pluma na plataforma. Para isso, foram utilizados perfis nos sentidos sul e norte; leste e oeste, para ambos os períodos de estudo. A Figura sul-norte na baixa descarga apresenta a velocidade média, para o período de baixa descarga, nos transectos sul - norte, para o Cenário I (A) e Cenário II (B), e a diferença entre eles (C). A média da elevação do mar, tiveram variações inferiores a 0, porém o gradiente de superfície manteve as alterações do fluxo no sentido sul. Os perfis de velocidade média no sentido sul-norte, tiveram comportamentos inversos na desembocadura: aumento de velocidade na baixa descarga e diminuição na alta descarga.

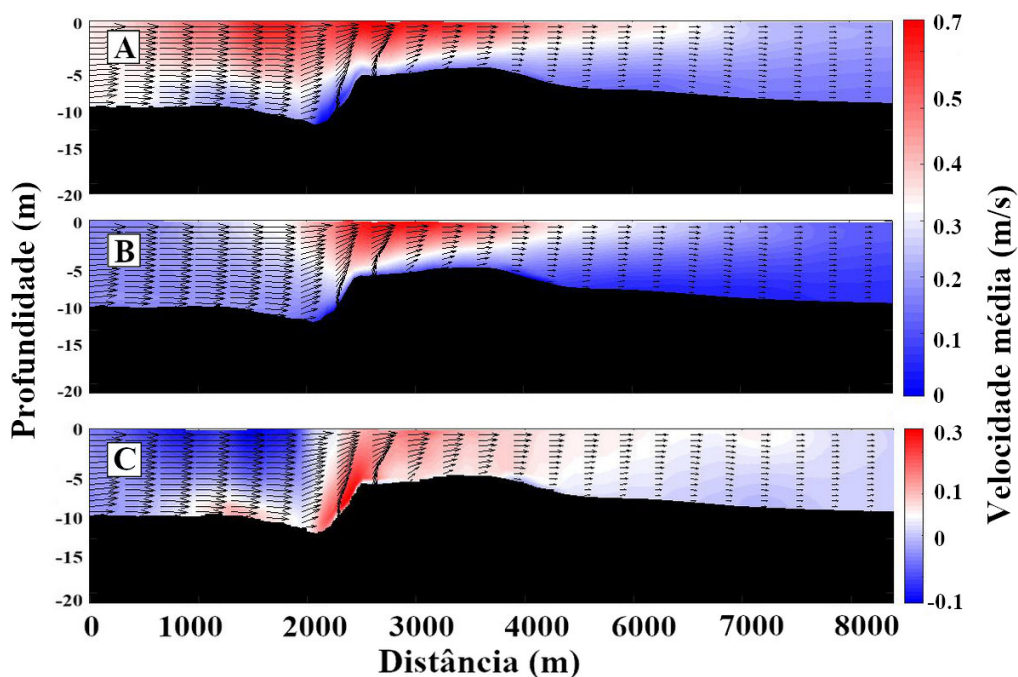


Figura 37: Perfis de velocidade média no sentido oeste – leste no período de baixa descarga. Em (A) podemos observar o resultado para o Cenário I, em (B) para o Cenário II e em (C) a diferença entre os dois cenários.

Na Figura 37, é visível uma diferença entre o Cenário I (A) e Cenário II (B). Em Cenário I, observa-se a concentração de pluma na desembocadura do canal e na comparação dos dois cenários em C a diferença entre as figuras se apresenta também na desembocadura, mostrando o local de maior velocidade entre os cenários mesmo em um período de baixa descarga.

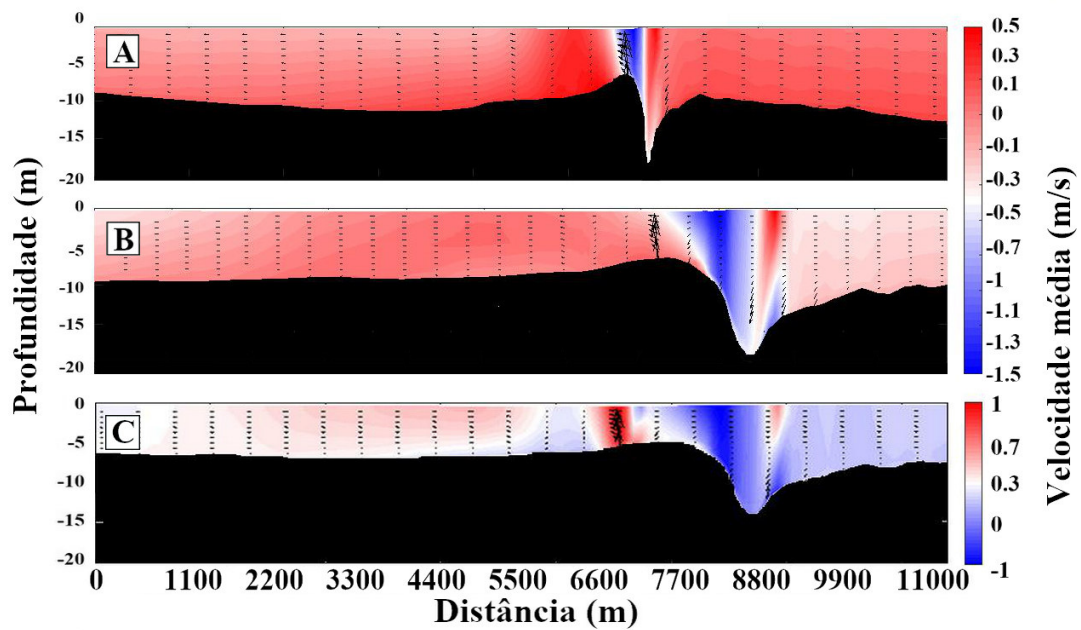


Figura 38: Perfis de velocidade média no sentido sul – norte no período de alta descarga. Em (A) podemos observar o resultado para o Cenário I, em (B) para o Cenário II e em (C) a diferença entre os dois cenários.

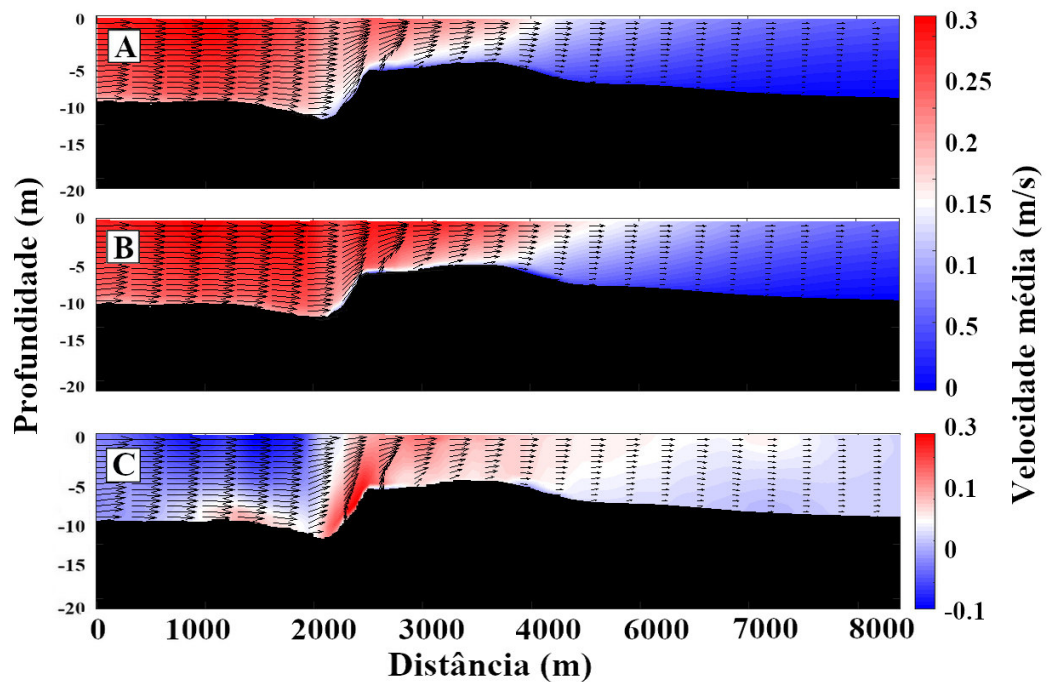


Figura 39: Perfis de velocidade média no sentido oeste – leste no período de alta descarga. Em (A) podemos observar o resultado para o Cenário I, em (B) para o Cenário II e em (C) a diferença entre os dois cenários.

Já a deformação da área da pluma acontece considerando as perturbações de velocidade média ao longo da vertical em relação à costa. Segundo Silva et al. [2015] o jato da pluma costeira da Lagoa dos Patos aumenta em função da configuração dos Molhes da Barra, corroborando os resultados e indicando um aumento de 16% na velocidade média na desembocadura dos molhes. A advecção devido ao campo médio de velocidade horizontal apresenta importância nos campos próximo, distante e o transporte dominante é em direção ao sudoeste, com um moderado espalhamento conforme a pluma se move em direção ao oceano, que observamos nas figuras de elevação da superfície livre.

Outra avaliação realizada para o estudo foi a correlação de variáveis: a análise de correlação de Spearman significativas. As variáveis de correlação adotadas foram conforme as afirmações já feitas por Marques et al. [2010a], onde a pluma da Lagoa dos Patos tem influência da descarga e da velocidade de corrente. Portanto, as variáveis de descarga anual e velocidade média de corrente como variáveis fixas, relacionadas com as demais séries temporais para cada ponto extraído nos cenários, variando entre si (Figuras 40 e 41).

A correlação é composta de gráfico de dispersão e histograma. Além disso, todas as associações possuem um r impresso junto às dispersões. Conforme a propriedade aplicada, os valores consideráveis se apresentam na cor vermelha. Os resultados de elevação da superfície ao sul (SSH-S), ao leste (SSH-L) e ao norte (SSH-N) têm relação perfeita, devido serem resultados da mesma simulação. Outras relações que se destacam são SSH-L e ACV, os quais estão inversamente correlacionados (-0.10) e entre ACV e TD (0.15), havendo então correlação entre os dados para a formação da pluma, para o Cenário I (Figura 40). Na Figura 41, essas relações não se repetem para SSH-L e ACV. Representando um desvio do sentido leste em relação à corrente e ao formato da desembocadura no Cenário II.

A correlação aplicada, para os pontos extraídos e para os cenários, Figura 40, para o Cenário I e a Figura 41, para o Cenário II, não se mostrou boa para a relação com a descarga e a velocidade de corrente. As correlações de SSH dos pontos com descarga e velocidade, se mostraram eficiente entre os resultados da simulação. As correntes de marés contribuem para o espalhamento da pluma transversal, reduzindo a estratificação vertical em direção ao oceano e aumento em direção a costa, elas também geram um efeito residual que tende a aumentar a

circulação vertical junto à desembocadura da Lagoa dos Patos, promovendo a mistura e intensificando o transporte de águas continentais ao longo da costa.

O padrão de circulação induzido pelas marés transversalmente a costa se alterna entre eventos de ressurgência e subsidência seguindo o período dominante (ciclo diurno) das marés. No fim do período de simulação, os padrões de circulação associados as marés induzem condições de ressurgência transversalmente a zona costeira junta a entrada da lagoa, a influência das marés reduz a estratificação promovendo condição mistura [MARQUES ET AL., 2010B].

A região da desembocadura se mostra no período de baixa descarga sem causar alterações no fluxo da pluma ao longo da plataforma. Os resultados refletem influência de ventos de nordeste/sudoeste que contribuem para o espalhamento da pluma em direção ao oceano aberto, com baixo espalhamento e reduzindo a estratificação vertical e longitudinal na plataforma. Estas condições de vento intensificam o processo de mistura junto a zona costeira evitando o espalhamento da pluma na costa [MARQUES ET AL., 2010B].

Enquanto no período de alta descarga, a pluma sai da desembocadura tensionada pelo jato, que a estrutura proporciona. Com a ajuda dos ventos norte, o espalhamento da pluma acontece em direção ao sudoeste e em direção ao oceano aberto. A influência dos ventos intensifica a estratificação vertical junto a boca da lagoa induzindo o deslocamento das águas de origem continental ao longo da costa. Estas condições de ventos intensificam os processos de ressurgência Horner-Devine et al. [2015], dissolvendo a pluma e intensificando a estratificação vertical em direção ao oceano aberto.

Conforme os pontos extraídos, o transporte acontece através da troca de água das entradas em cada ciclo das marés, estudado por Marques et al. [2010b] e as forçantes circulação são a maré e o vento. A estratificação das massas de água em altas vazões, alta descarga, é vista apenas a alguma distância das entradas uma média com cerca de 7km a leste e 5km ao sul, acompanhando a pluma de salinidade.

Já na baixa vazão desenvolve comportamentos diferentes nos cenários, o Cenário I possui menos efeito da descarga e mais ação das correntes costeiras, tendo dimensões distintas em ambos os cenários na direção sul. Em Cenário I, 5km e Cenário II, 8km, enquanto no sentido oeste, se mistura e alcança o campo distante em cerca de 7 km em ambos os cenários. Ou

seja, a alteração na desembocadura foi efetiva no campo distante ao sul, conduzindo a pluma se distanciar mais da desembocadura e alcançar uma maior distância, principalmente quando há uma baixa energia de maré.

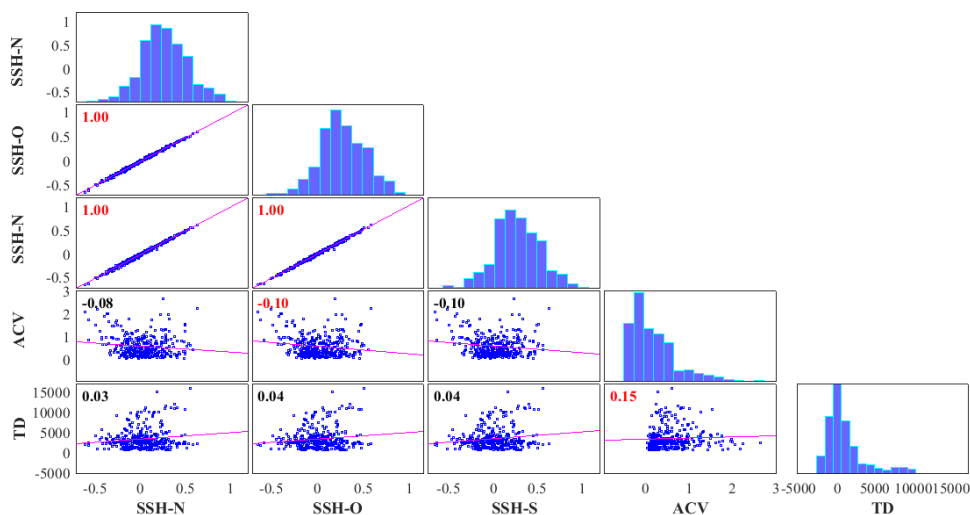


Figura 40: No eixo x, é apresentada a elevação da superfície livre nos pontos extraídos (SSH-S, SSH-L e SSH-N), a média da velocidade de corrente (ACV) e a descarga total (TD), para o Cenário I. A mesma sequência se repete no eixo y, inversamente.

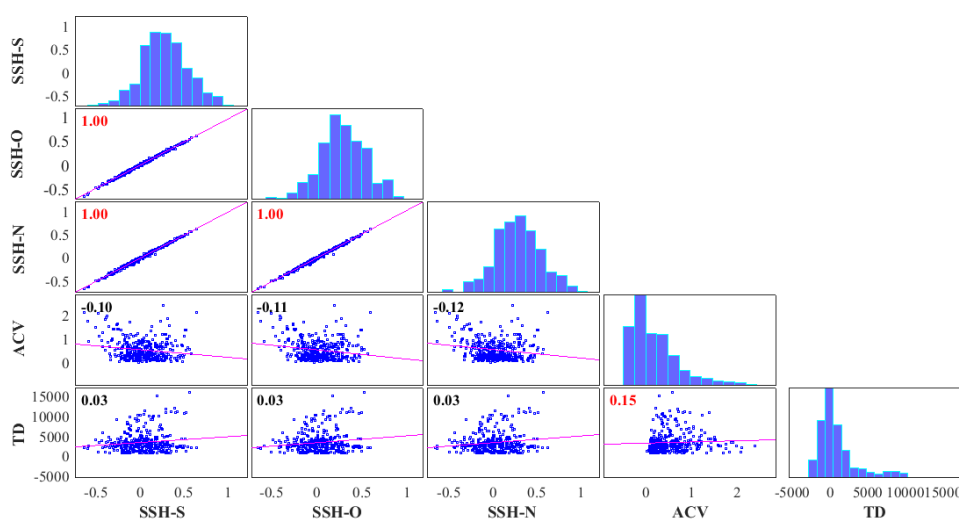


Figura 41: No eixo x, é apresentada a elevação da superfície livre nos pontos extraídos (SSH-S, SSH-L e SSH-N), a média da velocidade de corrente (ACV) e a descarga total (TD), para o Cenário II. A mesma sequência se repete no eixo y, inversamente.

Como já apresentado por Silva et al. [2015], no campo próximo, a desembocadura sofreu uma redução de velocidade no trecho do canal, Cenário II, e há um direcionamento da pluma

com propagação vertical constante em relação ao cenário anterior. Enquanto nas entradas de Cenário I, na baixa descarga, podemos afirmar que mesmo a descarga sendo baixa a velocidade da água são altas e o cisalhamento vertical cria turbulência suficiente para misturar a coluna de água na direção sul, próximo à desembocadura. Consequentemente, as trocas de água entre a lagoa e o mar são essencialmente barotrópicas. Estas mudanças provavelmente modificarão as interações entre a lagoa e o mar, a hidrodinâmica local ao redor do rio ou lagoa.

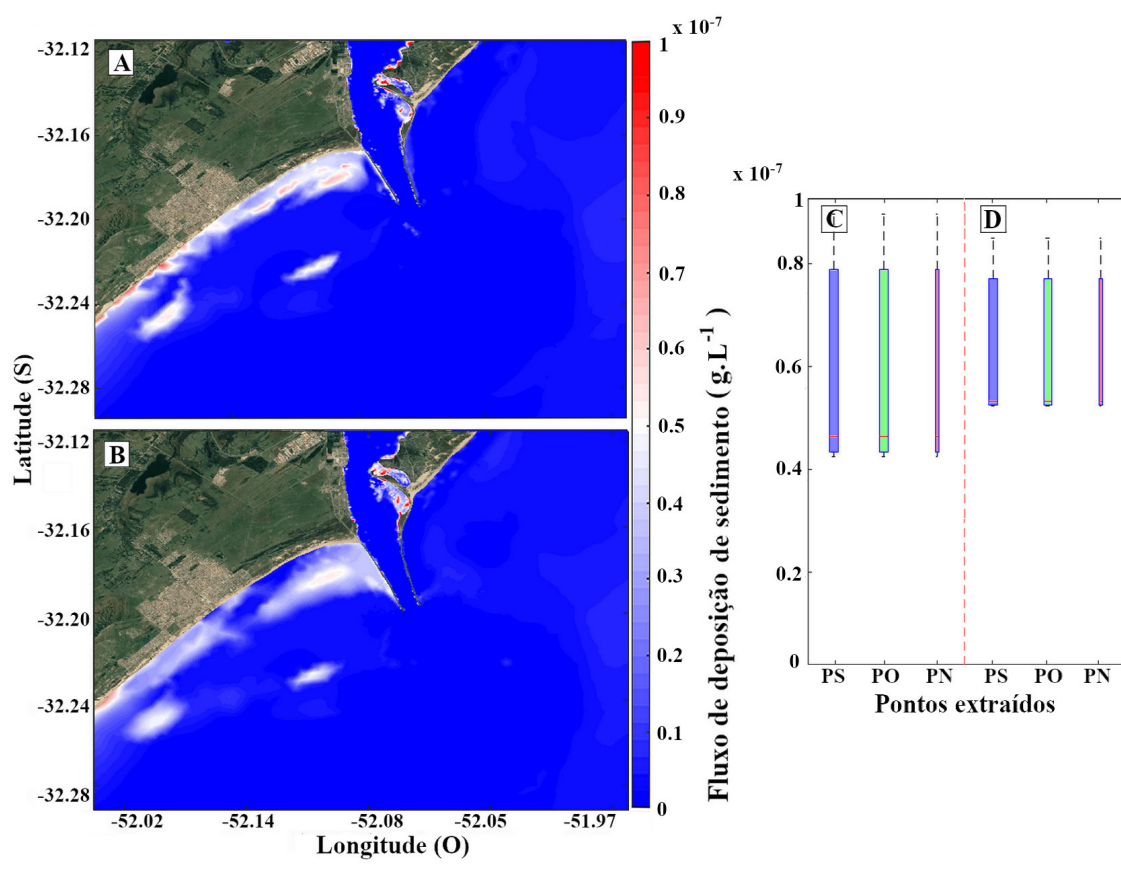


Figura 42: Concentração de fluxo de deposição de sedimento para o Cenário I (A) e o Cenário II (B) no período de baixa descarga. Diagrama *box plot* para cada um dos pontos extraídos nos cenários para o Cenário I (C) e o Cenário II (D). Com valores de mínimos e máximos, primeiro e terceiro quartil e mediana do conjunto de valores.

A taxa de transporte de sedimentos em suspensão (SS) aumenta com o aumento da velocidade, isto é, ocorre a ressuspensão o sedimento depositado do fundo, adicionando-o novamente no fluxo [MARTELO ET AL., 2019B]. O fluxo de deposição de sedimento (FDS) médio são observados no canal de acesso e regiões abrigadas do estuário, devido à influência dos processos de floculação dos sedimentos que alcançam a região (Figuras 42 e 43).

No período de baixa descarga, o deslocamento do SS para faixa de costa para a direção

sudoeste, acontece em ambos os cenários, com diferenças no fluxo próximo ao molhe da barra ao sul. Enquanto na Figura 43, sob alta descarga, a direção do fluxo de deposição se mostra em ambos os molhes. Sendo que na Figura 42 A, nos temos maiores resultados na direção nordeste em relação a Cenário II e também junto aos molhes em ambos os cenários. Os diagramas, sobre os pontos coletados, nas Figuras 42 C e Figura 42 D, confirma as observações feitas, já que no Cenário I, os valores dos pontos para todas as medidas são superiores do Cenário II.

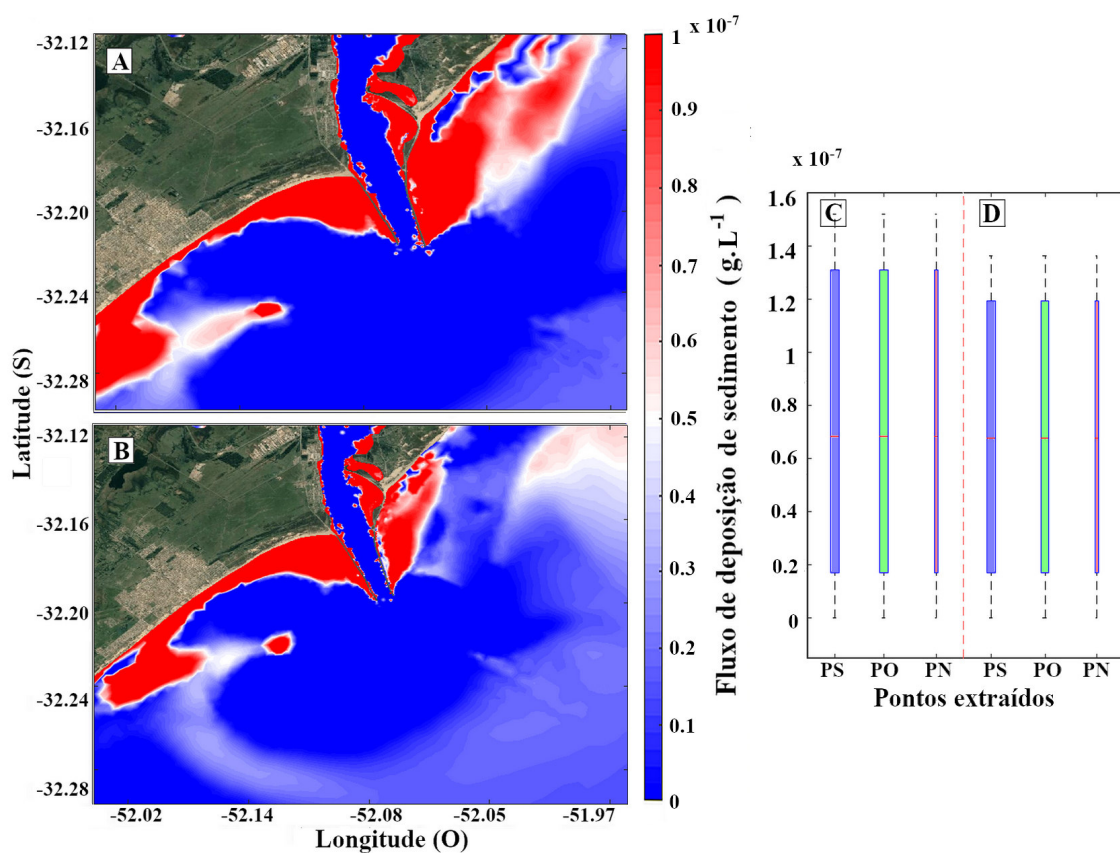


Figura 43: Concentração de fluxo de deposição de sedimento para o Cenário I (A) e o Cenário II (B) no período de alta descarga. Diagrama de *box plot* para cada um dos pontos extraídos nos cenários para o Cenário I (C) e o Cenário II (D). Com valores de mínimos e máximos, primeiro e terceiro quartil e mediana do conjunto de valores.

Na Figura 43, para o período de alta descarga, o FDS se mostra presente ao longo da linha da costa no Cenário I (Figura 43 A), principalmente nos sentidos norte e sul. No Cenário II (Figura 43 B), o FDS se distribui no sentido ao sul, sendo que ao norte há uma distribuição de FDS localizado próximo aos molhes da Barra. Com valores a cerca de 5.0×10^{-8} e 1.0×10^{-7} kg/L 5.0×10^{-8} e 1.0×10^{-7}). Nos diagramas, considera especificamente os pontos extraídos, não observamos muitas variações correndo no sentido sul, leste e norte.

Tabela 8: Resultados do modelo do diagrama para os dados de sedimento de suspensão e de fluxo de deposição nos períodos de estudo

		SS ($\times 10^{-3}$ Ton/dia)			FDS ($\times 10^{-9}$ kg/L)		
Baixa descarga		Mín.	Máx.	Med	Mín	Máx	Med
Cenário I	Ponto sul	1.60	1.76	6.40	4.60	9.61	5.03
	Ponto leste	1.29	9.67	1.45	4.60	9.61	5.03
	Ponto norte	1.04	1.74	1.65	4.60	9.61	5.02
Cenário II	Ponto sul	1.62	1.70	1.30	5.66	9.11	5.75
	Ponto leste	1.14	1.19	1.17	5.66	9.11	5.76
	Ponto norte	1.01	1.67	1.42	5.66	9.11	5.75
Alta descarga							
Cenário I	Ponto sul	6.02	0.17	0.11	0	1.52	6.83
	Ponto leste	0.13	0.17	0.14	0	0.6	0.68
	Ponto norte	0.13	0.14	0.14	0	0.16	6.82
Cenário II	Ponto sul	6.45	0.18	0.13	0	0.14	6.77
	Ponto leste	0.13	0.2	0.15	0	0.14	6.77
	Ponto norte	0.18	0.2	0.18	0	0.14	6.77

As Figuras 44 e 45, apresentam uma análise do FSD com os dados de velocidade média de corrente, e apresenta contribuição direta dos vórtices de que se forma na direção norte e sul dos molhes da Barra em ambos os cenários. O FDS ocorrem próximo à linha de costeira e nos molhes, fazendo com que a média dele, chega-se ao valor de $5.0 \times 10^{-5} \text{ kg.m}^{-2}/\text{s}$ na Figura 44 e $1.0 \times 10^{-7} \text{ kg.m}^{-2}/\text{s}$ na Figura 45.

A participação das correntes na formação de vórtices e de consequentemente no fluxo de deposição, ficam diretamente relacionados. Principalmente na Figura 45, que acompanhamos o destino das correntes somada ao FDS. No campo próximo, a intensidade de corrente intensifi-

cando a estratificação vertical em direção ao oceano aberto [HORNER-DEVINE ET AL., 2015]. No campo médio, a advecção de velocidade horizontal apresenta importância no processo de mistura da pluma, conduzindo o campo distante ser predominante na em direção ao sudoeste.

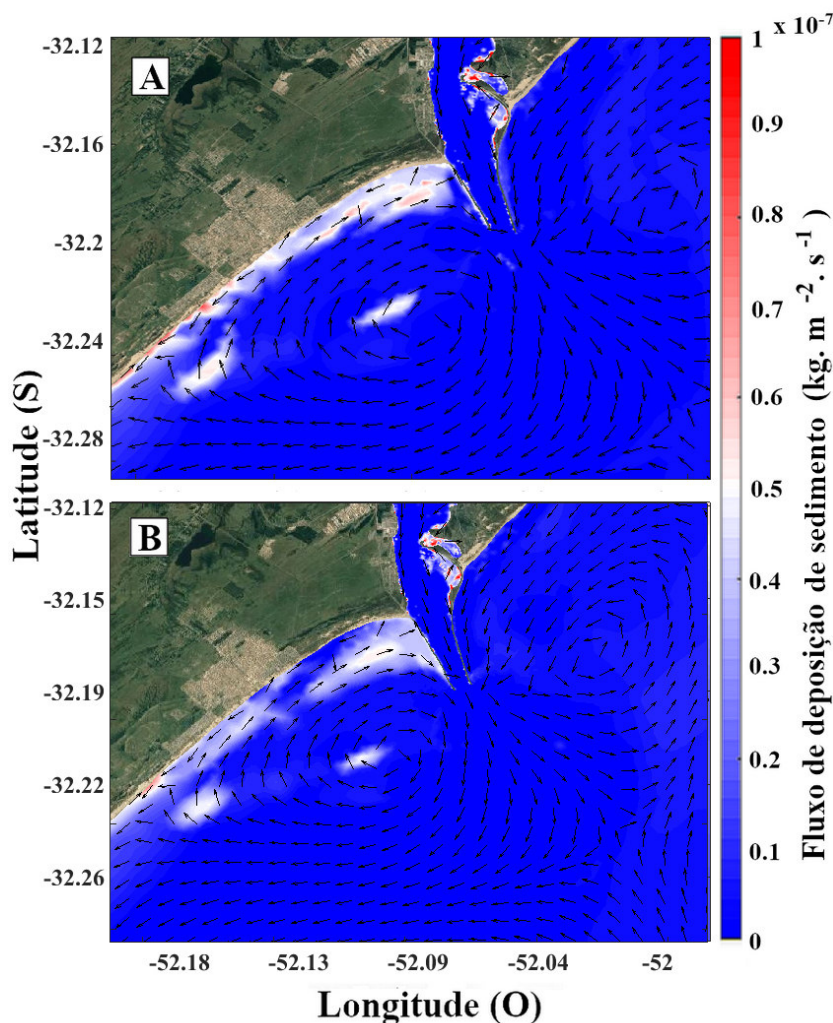


Figura 44: Concentração do fluxo de deposição de sedimentos com a intensidade de corrente no período de baixa descarga para Cenário I (A) e Cenário II (B).

Sendo que, nas figuras de superfície (Figura 44 e 45), que estão integradas com os dados de FDS (dados correlacionado a descarga da Lagoa dos Patos), veremos que na alta descarga (Figura 45 B), a intensidade de velocidade e os gradientes de FDS, estão difusos em relação à Figura 45 A. Somente o Ponto leste, para Cenário I, se apresentou análogo à descarga realizada na desembocadura; e que condiz com a correlação da Figura 31 e 32, em que ocorre o cisalhamento do fluxo sedimentar no mesmo ponto a leste, em relação aos demais pontos. Podendo admitir que segundo os trabalhos de Craske et al. [2015], a mistura longitudinal efetiva

proporcionada pela desembocadura, no sentido do fluxo é determinada por um equilíbrio entre o avanço longitudinal e a mistura radial.

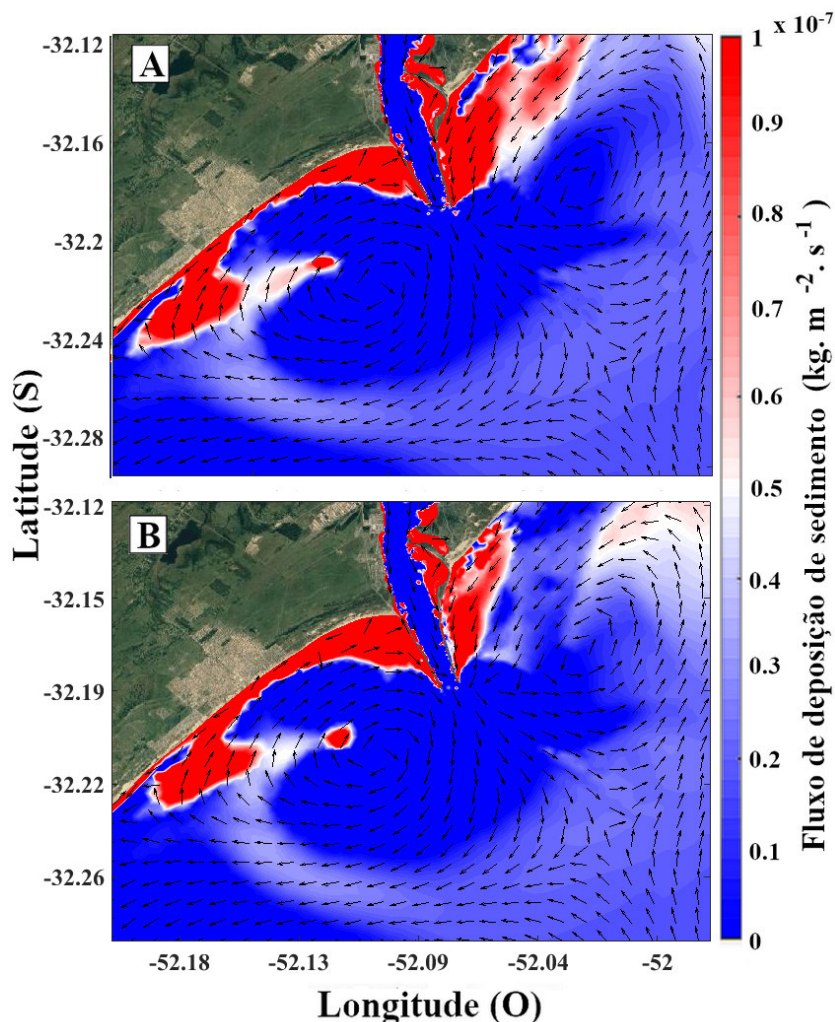


Figura 45: Concentração de fluxo de deposição de sedimentos com a intensidade de corrente no período de alta descarga para Cenário I (A) e Cenário II (B).

A formação de um vórtice ao sul da desembocadura da Lagoa dos Patos causados pela deflexão das linhas de fluxo ao contornarem os molhes em direção ao sul. Podemos acrescentar ao fluxo de FDS, a contribuição da velocidade de corrente superficial, demonstrados na Figura 44 e Figura 45, onde a participação das correntes na formação de vórtices e de consequentemente no fluxo de deposição, ficam diretamente relacionados. Principalmente na Figura 45, que a alta descarga se apresenta mais forte nos cenários.

Na região mais protegida, atrás do molhe ao sul, vemos uma região onde o rotacional é positivo (Figura 45, indicando a formação de um pequeno vórtice anti-ciclônico que fica

aprisionado. Além da plataforma, as estruturas costeiras habituadas a controlar a hidrodinâmica costeira e o movimento de sedimentos no estuário, tendem a gerar essa categoria de campo de rotação fora dele. Para Ghezzi et al. [2010], alteram a corrente residual corrente fluindo para o norte (da área sul do domínio) ao longo da costa e a divide em duas partes: uma cria o típico vórtice bipolar em frente às entradas e a outra flui em direção à costa.

A seção vertical de concentração de material em suspensão e velocidade de corrente indica o padrão de deposição gerado pelas condições hidrodinâmicas da região, onde as maiores velocidades verticais são observadas justamente na região onde o vórtice ciclônico é encontrado (região de rotacional negativo). Na região mais protegida, onde a condição de vorticidade anticiclônica é observada, os sedimentos ficam trapeados pela zona de recirculação formada na parte mais externa, o que dificulta a ressuspensão ou transporte destes sedimentos mais para o sul [GHEZZO ET AL., 2010].

A velocidade média de corrente superficial, se mostra um fator inversamente proporcional a descarga e a elevação da superfície livre, ou seja, a presença das forças de Ekman e a rotação da Terra, já estudadas por [MARQUES ET AL., 2010B]. Rijn [2005], ao discutir problemas de sedimentação no estuário e na costa, afirma que a sedimentação geralmente ocorre em locais onde a capacidade de transporte de sedimentos do sistema hidráulico é reduzida devido à diminuição das velocidades de correntes, ondas e os movimentos turbulentos relacionados.

Molhes longos são eficientes para que a sedimentação na entrada do canal, fazendo com que o transporte de sedimentos seja mínimo. Podendo resultar no acúmulo de sedimentos geralmente ocorrerá no lado de correnteza do molhe (a montante, ao sul) e a erosão no lado de descida (a jusante, ao norte) [RIJN, 2005]. Observamos que O FDS, acontece em volta da desembocadura em ambos os cenários, difuso no Cenário II em relação a Cenário I.

No campo médio, onde acontece a turbidez da pluma e é o responsável pela mistura e pela ressuspensão de sedimentos. Pode-se observar que os dados do fluxo de deposição do sedimento e com o perfil das figuras de sedimento e dependem da geometria da desembocadura para ocorrer. Além da presença de vórtices, mais intensa no período de alta descarga, fazendo o fluxo de deposição ser forte próximo à desembocadura. No campo distante, há uma continuidade do campo médio, até se esvaír, misturar por completo. Os termos de avanço e deformação

são necessários para explicar os processos de estratificação/mistura na desembocadura da Lagoa dos Patos, que se mostra dependendo da corrente de velocidade e descarga, como também apresentado por [MARQUES ET AL., 2010A].

O avanço devido à velocidade média parece ser importante nos campos próximos e distantes, e o transporte dominante está na direção sudeste, com dispersão à medida que a pluma se desloca para o mar. Enquanto a pluma de SS foi analisada pelo fluxo de deposição e que se apresentou com forte influência das correntes e pela atividade dos vórtices próximo às desembocaduras, com tendências a se depositarem próximo à linha da costa, molhes e na direção norte/sul dos vórtices.

Os cenários não se diferem em relação ao destino da pluma e podemos associar ao que foi apresentado por Marques et al. [2010c], temos três regiões de destaque: região próximo à desembocadura, com advecção vertical, com intensas velocidades verticais devido ao padrão de circulação gerado pela interação da circulação gravitacional com a zona costeira adjacente, criando zonas de convergência de fluxo, tornando-se favorecidas pelas características topográficas da parte oceânica do canal de acesso. Que se trata da nossa região de estudo, a configuração dos Molhes da Barra, onde o Cenário II, durante os períodos de alta descarga demonstram a atuação das forças verticais e padrão de circulação gerado no bojo da desembocadura.

A porção nordeste mostra-se com baixa deformação e advecção transversal à costa, nessa região da pluma a convergência entre correntes costeiras e os fluxos associados a circulação gravitacional promove a formação de zonas de convergência de fluxos que promovem o máximo espalhamento da pluma em direção ao oceano aberto transversalmente a zona costeira e a zona sudeste da desembocadura é controlada pela deformação e advecção ao longo da costa e a advecção transversal a zona costeira.

No sudeste da pluma os termos da advecção e deformação de campo ao longo da costa associados a influência da advecção transversal a costa controla a evolução da estratificação. Nessa região da pluma localizada mais distante da desembocadura, os processos de mistura dependem da prévia advecção das águas de origem continental e são principalmente controlados pela ação direta da circulação costeira ao longo da costa pelo transporte de Ekman induzido pela ação remota do vento (Figura 33). Estes efeitos ocorrem com escalas de tempo que variam

entre 2 a 20 dias com resposta a mudanças na tensão de cisalhamento do vento, e as respostas da tensão de cisalhamento nos campos de vento são correlacionadas às mudanças no campo de pressão atmosférica [MARQUES ET AL., 2010B].

4 CONCLUSÃO

A descarga e o vento têm contribuição direta na formação, transporte e extensão da pluma na plataforma. A descarga contribui com a sua formação, com a salinidade e o sedimento em suspensão, em seguida, a elevação da superfície. A corrente proporciona o deslocamento da pluma no canal e o espalhamento na plataforma.

A salinidade superficial pode ser melhor avaliada no período de baixa descarga, quando há diferenças visíveis na desembocadura dos molhes, e nas regiões a jusante e montante dos molhes. No Cenário I, ocorre a presença de altas (baixas) salinidades a jusante (montante) dos molhes. A área do jato direcionado para o sul da plataforma apresenta uma alta salinidade superficial, que se espalha próximo a montante dos molhes. Quando comparamos ao Cenário II, temos alterações principalmente na desembocadura, onde a área do bojo se apresenta menor sendo o alcance melhor direcionado, demonstrando baixa pressão na desembocadura no Cenário II. Os perfis verticais reforçam o comportamento e direção da pluma.

A formação da pluma de sedimento superficial é similar e complementar à de salinidade superficial. A variável de sedimento superficial pode ser verificada com o período de alta descarga. Os resultados de Sperman mostram que o modelo foi calibrado corretamente. Há também relação com a descarga, nos sentidos leste e norte (gráficos de dispersão positiva), são mais afetados pela alteração dos molhes.

A análise dos campos superficiais comparativa entre os resultados dos dois cenários mostra que o sentido sul possui o mesmo impacto (direção principal da pluma). Essa afirmativa também pode ser realizada em relação aos perfis. Sendo que as direções leste e norte o Cenário II, tem índices maiores, ratificando a influência dos molhes nessas direções. Os molhes têm contribuído para o controle sedimentar da Lagoa, e promovem a propagação da linha costeira nos molhes ao sul (montante) e erosão próximo ao molhe norte (jusante). Ou seja, a estrutura dos molhes, fez com que o comportamento e direção da pluma fosse modificado, para influenciar na desembocadura dos molhes e nas regiões a jusante e montante da estrutura. Além de modificar a região próxima da costa com a baixa salinidade superficial nos períodos de descarga da Lagoa dos Patos.

Ao colocarmos a pluma no contexto de campos: próximo, médio e distante. O campo próximo da pluma, em ambos os períodos se apresentou diretamente influenciado pela descarga e de intensidade continua da elevação da superfície. O campo médio, tem contribuições da velocidade de corrente, resultando no campo distante ao sudoeste. Ambos os campos tem contribuição da descarga da Lagoa dos Patos, enquanto o campo médio, ou campo de ressuspensão, acontece com influência da corrente de ventos e dos vórtices presentes, próximo à desembocadura. A rosa-dos-ventos, com os resultados extraídos dos modelos, mostra predominância dos ventos nordeste e reforça a direção da pluma ao sul da plataforma.

Mesmo com a ausência dos dados iniciais de maré, o fluxo de deposição de sedimento, se mostraram orientados pelas velocidades de corrente e vórtices existentes na região no campo médio, em frente aos molhes da Barra. No momento de captura do período de alta descarregar, é possível observar os vórtices acompanhando o comportamento do fluxo de deposição de sedimentos em suspensão na plataforma. A formação de vórtices pode modificar a topologia, intensificar o assoreamento e erosão costeira, o que é observado no Cenário I, no período de alta descarga. Há um acúmulo de sedimento, ocorrendo na jusante dos molhes, o que se modifica já no Cenário II.

Nas figuras de superfície de fluxo de deposição de sedimentos em suspensão, comparando os dois cenários, temos no Cenário II, uma menor deposição de sedimento acontecendo na jusante e a montante dos molhes, paralelo à linha de costa. Demonstrando que a alteração da estrutura proporcionou redução no fluxo sedimentar próximo ao canal. Vale destacar que a erosão não foi calculada, devido o não uso de análise da camada de profundidade. Os curtos períodos extraídos, podem não refletir imediatamente na formação da pluma, que pode sofrer alterações de 30 – 180 dias.

Com base nos resultados encontrados e confrontados, foi observado que ocorreram alterações no padrão de formação, comportamento e destino da pluma da Lagoa dos Patos. Estes resultados poderão contribuir para estudos futuros sobre a Lagoa dos Patos. Já a metodologia utilizada, modelo, calibração e validação, também serão de úteis para os trabalhos de modelagem computacional regional e global. De uma forma geral, podemos concluir que:

- A descarga tem contribuição direta na formação, tamanho e extensão da pluma na plata-

forma;

- Sobre os períodos, o período 2 de alta descarga foi o ideal para avaliar a pluma, em que ela se apresenta com menos salinidade superficial e em contraponto carrega maior quantidade de material sedimentar suspenso;
- O período 1 foi importante para realizar contrapontos sobre o período 2, sobre a formação, comportamento e destino da pluma. Avaliando também os campos próximos, médio e distante, além das dinâmicas de transporte;
- A Plataforma Atlântico Sul é sujeita as alterações climáticas, que podem alterar o comportamento da velocidade de corrente e elevação da superfície, e consequentemente da pluma;
- Os ventos no que lhe concerne, tem contribuições com o transporte da pluma, além de forças físicas como rotação da Terra e o transporte de Ekman;
- Os molhes têm contribuído para o controle sedimentar da Lagoa e como produzem uma progradação da linha costeira nos molhes ao sul (montante) e erosão ao norte (jusante);
- O fluxo de deposição de sedimento se mostrou orientado pelas velocidades de corrente e vórtices existentes na região. Tendo se comportado com ressuspensão próximo aos molhes, montante e jusante deles. Podendo representar alterações no ambiente local, dependendo a descarga ao logo do ano;
- Com a alteração dos cenários, houve uma mudança no campo próximo da pluma, quanto a sua velocidade, intensidade e direcionamento. O campo médio, teve alteração no movimento de ressuspensão da pluma de sedimento. Por último, o campo distante manteve seu destino ao sul em ambos os cenários.

4.1 Sugestões para trabalhos futuros

As recomendações para trabalhos futuros são baseadas nas limitações das abordagens usadas neste trabalho. Os resultados obtidos para ambos os temas foram limitados em virtude das simplificações das simulações hidrodinâmicas e pela disponibilidade de informações in situ;

- Utilizar dados iniciais de marés, usar dados da camada de profundidade, para calcular a erosão. Outros períodos de descarga e até mesmo mais anos simulados, para poder ser comparado as modificações dos molhes em relação a outros fenômenos e situações que a plataforma continental sofra;
- Cálculos estatísticos quanto ao espalhamento radial da pluma de sedimento em suspensão e salinidade superficial, de preferência com simulações mais longas e contínuas, para observar melhor os campos da pluma e as diferentes descargas ao longo do ano;
- Realizar verificações de geoprocessamento, para realizar relação com o modelo SEDI-3D e realizar métodos baseados volumes de controle.

A condução deste trabalho ocorreu a partir do emprego de um modelo hidrostático. Discussões sobre fenômenos como formação de ondas internas geradas pela pluma e sobre o transporte de sal na plataforma não foram abordados, podendo ser abordados por modelagem computacional em trabalhos futuros. Uma última recomendação se refere ao uso de condições de contornos atmosféricas e oceânicas a partir de modelos regionais e não globais. Desta forma, fenômenos de menor escala temporal e maior resolução espacial podem ser propriamente reproduzidos na região de estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Weber F L De Souza, , Paulo R P De Medeiros, Nilva Brandini, and Bastiaan Knoppers. Dams impacts upon the fluxes of biogenic matter. *Revista Virtual de Química*, 3(2):116–128, 2011. ISSN 19846835. doi: 10.5935/1984-6835.20110016.
- João Luiz Nicolodi, Ademilson Zamboni, and Gilberto Fonseca Barroso. Gestão Integrada de Bacias Hidrográficas e Zonas Costeiras no Brasil: Implicações para a Região Hidrográfica Amazônica. *Revista de Gestão Costeira Integrada*, 9(2):9–32, 2009. doi: 10.5894/rgci115.
- Kevin E. Trenberth, Lesley Smith, Taotao Qian, Aiguo Dai, and John Fasullo. Estimates of the Global Water Budget and Its Annual Cycle Using Observational and Model Data. *Journal of Hydrometeorology*, 8(4):758–769, 2007. ISSN 1525-755X. doi: 10.1175/jhm600.1.
- H Postma, J J Zijlstra, and D. Eisma. An Introduction to the Geology of Continental Shelves. In J.J. Postma, H. and Zijlstra, editor, *Ecosystems of the World 27*, pages 5–25. Elsevier, Amsterdam, elsevier edition, 1987.
- K H Mann and J R N Lazier. *Dynamics of Marine Ecosystems*. Number 4 in 85. Blackwell Publishing, Nova Scotia, Canada, 2 edition, 2006. ISBN 9781405111188. doi: 10.2307/2960585.
- Richard W Garvine. Estuary PLumes and Fronts in Shelf Waters: A Layer Model. *Journal of Physical Oceanography*, 17:1877–1897, 1987.
- Paul M DiGiacomo, Libe Washburn, Benjamin Holt, and Burton H Jones. Coastal Pollution Hazards in Southern California Observed by SAR Imagery: Stormwater Plumes, Wastewater Plumes, and Natural Hydrocarbon Seeps. *Marine Pollution Bulletin*, 49(11-12):1013–1024, 2004. ISSN 0025326X. doi: 10.1016/j.marpolbul.2004.07.016.
- Alexander R. Horner-Devine, Robert D. e Hetland, and Daniel G. MacDonald. Mixing and Transport in Coastal River Plumes. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 47(1):569–594, 2015. ISSN 0066-4189. doi: 10.1146/annurev-fluid-010313-141408.

- Richard W. Garvine. A dynamical system for classifying buoyant coastal discharges. *Continental Shelf Research*, 15(13):1585–1596, 1995. ISSN 02784343. doi: 10.1016/0278-4343(94)00065-U.
- Matthias Tomczak and J Stuart Godfrey. Ekman layer transports, Ekman pumping and the Sverdrup balance. In *Regional Oceanography*, pages 39–51. Elsevier, 1994. ISBN 978-0-08-041021-0. doi: 10.1016/B978-0-08-041021-0.50008-4. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780080410210500084>.
- D. A. Fong, W. R. Geyer, and R. P. Signell. The Wind-forced Response on a Buoyant Coastal Current: Observations of the Western Gulf of Maine Plume. *Journal of Marine Systems*, 12(1-4):69–81, 1997. ISSN 09247963. doi: 10.1016/S0924-7963(96)00089-9.
- W.C. Marques, E.H. Fernandes, B.C. Moraes, O.O. Möller, and A. Malcherek. The dynamics of Patos Lagoon coastal plume and their contribution for the deposition pattern of suspended sediments in the Southern Brazilian inner Shelf. *Journal of Geophysical Research*, in press, 2010a.
- Alberto R. Piola, Ricardo P. Matano, Elbio D. Palma, Osmar O. Möller, and Edmo J.D. Campos. The influence of the Plata River discharge on the western South Atlantic shelf. *Geophysical Research Letters*, 32(1):1–4, 2005. ISSN 0094827611. doi: 10.1029/2004GL021638.
- Vincent Combes and Ricardo P. Matano. Trends in the Brazil/Malvinas Confluence region. *Geophysical Research Letters*, IV(April):6413–6419, 2014. ISSN 19448007. doi: 10.1002/2014GL061184. Received.
- Wiliam C. Marques, Elisa H.L. Fernandes, and Osmar O. Moller. Straining and advection contributions to the mixing process of the Patos Lagoon coastal plume, Brazil. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(6), 2010b. ISSN 21699291. doi: 10.1029/2009JC005653. URL <http://www.agu.org/pubs/crossref/2010/2009JC005653.shtml>.
- Paulo C. Abreu, Marli Bergesch, Luis A. Proença, Carlos A.E. Garcia, and Clarisse Odebrecht. Short- and Long-Term Chlorophyll a Variability in the Shallow Microtidal Patos Lagoon

- Estuary, Southern Brazil. *Estuaries and Coasts*, 33(2):554–569, 2010. ISSN 15592723. doi: 10.1007/s12237-009-9181-9.
- André Felipe Martelo. *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, Rio Grande, 2019.
- F.N. Alves. *Porto e Barra do Rio Grande: história, memória e cultura portuária*. CORAG, Porto Alegre, 2008.
- J.E. Dugan, L. Airoidi, M.G. Chapman, S.J. Walker, and T. Schlacher. Estuarine and Coastal Structures. *Treatise on Estuarine and Coastal Science*, 8:17–41, 2012. doi: 10.1016/b978-0-12-374711-2.00802-0. URL <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-374711-2.00802-0>.
- A F Blumberg and G L Mellor. Description Of A Three-Dimensional Coastal Ocean Circulation Model, In Three-Dimensional Coastal Ocean Models. *Coastal Estuarine Sci.*, 4, 1987.
- Su-Ying Ou, Hong Zhang, Dong-Xiao Wang, and Jie He. Horizontal Characteristics of Buoyant Plume off the Pearl River Estuary during Summer. *Journal of Coastal Research*, 50 (0749.0208):652–657, 2007.
- L. H. Holthuijsen, N. Booij, R. C. Ris, IJ. G. Haagsma, A. T. M. M. Kieftenburg, E. E. Kriezi, and M. Zijlema. SWAN Cycle III version 40.20 USERMANUAL, 2003.
- Alexander F Shchepetkin and James C McWilliams. The regional oceanic modeling system (ROMS): A split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. *Ocean Modelling*, 9(4):347–404, 2005. ISSN 14635003. doi: 10.1016/j.ocemod.2004.08.002.
- P. Cugier and P. Le Hir. Development of a 3D hydrodynamic model for coastal ecosystem modelling. Application to the plume of the Seine River (France). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 55(5):673–695, 2002. ISSN 02727714. doi: 10.1006/ecss.2001.0875.

- V. B. Schmitt. *Transporte diferencial de ovos e larvas de peixes na desembocadura do estuário da Lagoa dos Patos*. Trabalho de conclusão de curso, Univerisdade Federal do Rio Grande, 2010.
- Wilian Correa Marques, Igor Oliveira Monteiro, and Osmar Olinto Möller. The Exchange Processes in the Patos Lagoon Estuarine Channel, Brazil. *International Journal of Geosciences*, 02(03):248–258, 2011. ISSN 2156-8359. doi: 10.4236/ijg.2011.23027.
- Douglas Vieira da Silva, Phelype Haron Oleinik, Juliana Costi, Eduardo de Paula Kirinus, and Wiliam Correa Marques. Residence time patterns of Mirim Lagoon (Brazil) derived from two-dimensional hydrodynamic simulations. *Environmental Earth Sciences*, 78(5):0, 2019. ISSN 18666299. doi: 10.1007/s12665-019-8162-y. URL <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-019-8162-y>.
- A F Martelo, T B Trombetta, B V Lopes, W C Marques, and O O Möller. Impacts of dredging on the hydromorphodynamics of the Patos Lagoon estuary, southern Brazil. *Ocean Engineering*, 188:1–10, 2019a. doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106325>.
- Liliane Paranhos Bitencourt, Elisa Fernandes, Osmar Möller, and Lauren Ross. The Contribution of ENSO Cycles to the Salinity Spatio-Temporal Variability in a Bar-Built Microtidal Estuary. *Regional Studies in Marine Science*, 40:101496, 2020. ISSN 23524855. doi: 10.1016/j.rsma.2020.101496. URL <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2020.101496>.
- Elisa Helena Fernandes, Pablo Dias Da Silva, Glauber Acunha Gonçalves, and Osmar Olinto Möller. Dispersion plumes in open ocean disposal sites of dredged sediment. *Water (Switzerland)*, 13(6):1–20, 2021. ISSN 20734441. doi: 10.3390/w13060808.
- Juliana Tavora, Elisa H L Fernandes, Andrew C Thomas, Ryan Weatherbee, and Carlos A F Schettini. The influence of river discharge and wind on Patos Lagoon, Brazil, Suspended Particulate Matter. *International Journal of Remote Sensing*, 40(12):4506–4525, 2019. ISSN 13665901. doi: 10.1080/01431161.2019.1569279. URL <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1569279>.

Douglas Vieira da Silva. *Circulação nas escalas costeira, de plataforma e de grande escala e sua influência no ambiente marinho*. Instituto Virtual para o Desenvolvimento Sustentável, Rio de Janeiro, ivides edition, 2020. ISBN 978-65-00-35645-8.

Eduardo de Paula Kirinus, Wiliam Correa Marques, Julliet Correa da Costa, Elisa Helena Leão Fernandes, Julliet Correa da Costa, and Elisa Helena Leão Fernandes. The Contribution of Waves in Mixing Processes of the Patos Lagoon Plume. *International Journal of Geosciences*, 03(05):1019–1026, 2012. ISSN 2156-8359. doi: 10.4236/ijg.2012.35102.

Richard W Garvine. The impact of model configuration in studies of buoyant coastal discharge. *Journal of Marine Research*, 59(2):193–225, 2001. ISSN 15439542, 00222402. doi: 10.1357/002224001762882637. URL <http://www.ingentaselect.com/rpsv/cgi-bin/cgi?ini=xrefebody=linkerereqdoi=10.1357/002224001762882637>.

Francisco José da Silva Dias. *Circulação e massas de água na plataforma continental leste do Ceará: modelagem numérica e observações*. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

Flávio Augusto Bastos da Cruz Martins. *MODELAÇÃO MATEMÁTICA TRIDIMENSIONAL DE ESCOAMENTOS COSTEIROS E ESTUARINOS USANDO UMA ABORDAGEM DE COORDENADA VERTICAL GENÉRICA*. Dissertação, UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA, 1989a.

Ana B.Villas Bôas, Fabrice Ardhuin, Alex Ayet, Mark A. Bourassa, Peter Brandt, Bertrand Chapron, Bruce D. Cornuelle, J. T. Farrar, Melanie R. Fewings, Baylor Fox-Kemper, Sarah T. Gille, Christine Gommenginger, Patrick Heimbach, Momme C. Hell, Qing Li, Matthew R. Mazloff, Sophia T. Merrifield, Alexis Mouche, Marie H. Rio, Ernesto Rodriguez, Jamie D. Shutler, Aneesh C. Subramanian, Eric J. Terrill, Michel Tsamados, Clement Ubelmann, and Erik van Sebille. Integrated observations of global surface winds, currents, and waves: Requirements and challenges for the next decade. *Frontiers in Marine Science*, 6(JUL):1–34, 2019. ISSN 22967745. doi: 10.3389/fmars.2019.00425.

- L. F. F. Mendonça. Caracterização Da Frente Subtropical De Plataforma E Seu Impacto Na Atmosfera Utilizando O Modelo Regional Acoplado Coawst. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9):1689–1699, 2013. ISSN 1098-6596. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- K Mann. Sedimentation at Jetties. Technical report, HR Wallingford, 1991. URL <http://eprints.hrwallingford.com/id/eprint/310>.
- D. W. Pritchard. Salinity distribution and circulation in the Chesapeake bay estuarine system. *Journal of Marine Research*, XI(2):106–123, 1952.
- Richard W Garvine. Observations of the motion field of the Connecticut River plume. *Journal of Geophysical Research*, 82(3):441–454, 1977. ISSN 01480227. doi: 10.1029/JC082i003p00441. URL <http://doi.wiley.com/10.1029/JC082i003p00441>.
- Robert D. Hetland and Richard P. Signell. Modeling coastal current transport in the Gulf of Maine. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 52(19-21 SPEC. ISS.): 2430–2449, 2005. ISSN 09670645. doi: 10.1016/j.dsr2.2005.06.024.
- T. A. McClimans. Estuarine fronts and river plumes. *Physical processes in estuaries*, pages 55–69, 1988.
- Alexander R. Horner-Devine, David A. Jay, Philip M. Orton, and Emily Y. Spahn. A conceptual model of the strongly tidal Columbia River plume. *Journal of Marine Systems*, 78(3):460–475, 2009. ISSN 09247963. doi: 10.1016/j.jmarsys.2008.11.025. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmarsys.2008.11.025>.
- Robert D Hetland. Relating River Plume Structure to Vertical Mixing. *Journal of Physical Oceanography*, 35(9):1667–1688, 2005. ISSN 0022-3670. doi: 10.1175/jpo2774.1.
- Richard W. Garvine. A steady state model for buoyant surface plume hydrodynamics in coastal waters. *Tellus*, 34(3):293–306, 1982. ISSN 0040-2826. doi: 10.3402/tellusa.v34i3.10813.
- Vassiliki H. Kourafalou, Lie Yauw Oey, John D. Wang, and Thomas N. Lee. The fate of river discharge on the continental shelf 1. Modeling the river plume and the inner shelf coastal

- current. *Journal of Geophysical Research C: Oceans*, 101(C2):3415–3434, 1996. ISSN 01480227. doi: 10.1029/95JC03024.
- Nan D. Walker, William J. Wiseman, Lawrence J. Rouse, and Adele Babin. Effects of river discharge, wind stress, and slope eddies on circulation and the satellite-observed structure of the Mississippi River plume. *Journal of Coastal Research*, 21(6):1228–1244, 2005. ISSN 07490208. doi: 10.2112/04-0347.1.
- G. Blumberg, A. F. and Mellor. Numerical model of the middle Atlantic bight circulation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 58 n.10, 1977.
- W J Wiseman and R W Garvine. Plumes and Coastal Currents near Large River Mouths. *Estuaries*, 18(3):509, 1995. ISSN 01608347. doi: 10.2307/1352368. URL <http://link.springer.com/10.2307/1352368>.
- W. R. Geyer, J. D. Woodruff, and P. Traykovski. Sediment transport and trapping in the Hudson River estuary. *Estuaries*, 24(5):670–679, 2001. ISSN 01608347. doi: 10.2307/1352875.
- Felipe M Pimenta and A D Kirwan. The response of large outflows to wind forcing. *Continental Shelf Research*, 89:24–37, 2014. ISSN 02784343. doi: 10.1016/j.csr.2013.11.006.
- Wiliam C. Marques, Elisa H.L. Fernandes, Bruno C. Moraes, Osmar O. Möller, and Andreas Malcherek. 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*, 115(10):1–22, 2010c. ISSN 21699291. doi: 10.1029/2010JC006190.
- I.O. Monteiro, W. C. Marques, E. H. Fernandes, R. C. e Gonçalves, Möller Jr., and O. O. On the Effect of Earth Rotation, River Discharge, Tidal Oscillations, and Wind in the Dynamics of the Patos Lagoon Coastal Plume. *Journal of Coastal Research*, 27(1):120, 2011. ISSN 1551-5036. doi: 10.2112/jcoastres-d-09-00168.1.
- IBGE. *Atlas geográfico das zonas costeiras e oceânicas do Brasil*. IBGE, Diretoria de Geociências, Rio de Janeiro, 2011. ISBN 9788524042195.

- CNUMAD. Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento. In Subsecretaria de Edições Técnicas Senado Federal, editor, *Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento*, Rio de Janeiro, 1992. Embrapa.
- Fabio Bulleri and Maura G. Chapman. The introduction of coastal infrastructure as a driver of change in marine environments. *Journal of Applied Ecology*, 47(1):26–35, 2010. ISSN 00218901. doi: 10.1111/j.1365-2664.2009.01751.x.
- Ali Masria, Abdelazim Negm, Moheb Iskander, and Oliver C. Saavedra. Numerical Investigation of the Impact of Jetties on Accretion Problem at Rosetta Promontory, Egypt. *International Journal of Environmental Science and Development*, 5(6):510–516, 2014. ISSN 20100264. doi: 10.7763/ijesd.2014.v5.536.
- Matthew J Perkins, Terence P T Ng, David Dudgeon, Timothy C Bonebrake, and Kenneth M Y Leung. Conserving intertidal habitats: What is the potential of ecological engineering to mitigate impacts of coastal structures? *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 167:504–515, 2015. ISSN 02727714. doi: 10.1016/j.ecss.2015.10.033. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2015.10.033>.
- Yan Xing, Congfang Ai, and Sheng Jin. A three-dimensional hydrodynamic and salinity transport model of estuarine circulation with an application to a macrotidal estuary. *Applied Ocean Research*, 39:53–71, 2013. ISSN 01411187. doi: 10.1016/j.apor.2012.10.003. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.apor.2012.10.003>.
- J Alveirinho Dias, Cristina Bernardes, Maria Rosário Bastos, Joana Gaspar de Freitas, and e Virgínia Martins. INTERACÇÕES HOMEM – MEIO EM ZONAS COSTEIRAS: O CASO DE AVEIRO, PORTUGAL. *Rede Braspor*, pages 215–235, 2012.
- Francesco Cozzoli, Tjeerd J. Bouma, Pauline Ottolander, Maria Salvador Lluch, Tom Ysebaert, and Peter M.J. Herman. The combined influence of body size and density on cohesive sediment resuspension by bioturbators. *Scientific Reports*, 8(1), 2018. ISSN 20452322. doi: 10.1038/s41598-018-22190-3. URL <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-018-22190-3>.

- Michol Ghezzi, Stefano Guerzoni, Andrea Cucco, and Georg Umgieser. Changes in Venice Lagoon dynamics due to construction of mobile barriers. *Coastal Engineering*, 57(7):694–708, 2010. ISSN 03783839. doi: 10.1016/j.coastaleng.2010.02.009. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2010.02.009>.
- C. G.; Ball, H.; Fellouah, and A. Pollard. The Flow Field in Turbulent Round Free Jets. *Progress in Aerospace Sciences*, 50:1–26, 2012. ISSN 03760421. doi: 10.1016/j.paerosci.2011.10.002. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.paerosci.2011.10.002>.
- Ministério do Meio Ambiente BRASIL. *Plano de Gerenciamento Costeiro no Brasil - relato de 25 anos*. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, brasil edition, 2015. ISBN 9788577382354.
- Frédéric Monié and Soraia Maria do S. C. Vidal. Cidades, portos e cidades portuárias na era da integração produtiva. *Revista de Administração Pública*, 40(6):975–995, 2006. doi: 10.1590/s0034-76122006000600003.
- Renan Alves Conceição and Marcelo Vínicius de La Rocha Domingues. Gestão Ambiental e Gerenciamento Costeiro Integrado : uma análise do Estudo de Concepção da Revitalização Ambiental da Orla do Saco da Mangueira, Rio Grande, RS, Brasil. *4º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente*, 4(1998), 2014.
- Andréia Vigolo Lourenço and Milton Lafourcade Asmus. Gestão Ambiental Portuária: fragilidades, desafios e potencialidades no porto do Rio Grande, RS, Brasil. *Revista de Gestão Costeira Integrada*, 15(2):223–235, 2014. doi: 10.5894/rgci498.
- Wilian Correa Marques, Igor Oliveira Monteiro, Osmar Olinto, Möller Jr, and Elisa Helena Fernandes. Wilian Correa Marques*, Igor Oliveira Monteiro, Osmar Olinto Möller Jr, Elisa Helena Fernandes. *Atlantic*, pages 1311–1314, 2006.
- W. C. Marques, E. H. Fernandes, I. O. Monteiro, and O. O. Möller. Numerical modeling of the Patos Lagoon coastal plume, Brazil. *Continental Shelf Research*, 29(3):556–571, 2009. ISSN 02784343. doi: 10.1016/j.csr.2008.09.022.
- P. D. Silva, P. V. Lisboa, and E. H. Fernandes. Changes on the fine sediment dynamics after the

- Port of Rio Grande expansion. *Advances in Geosciences*, 39:123–127, 2015. ISSN 16807359. doi: 10.5194/adgeo-39-123-2015.
- Douglas Vieira da Silva. *Padrões de Circulação e Transporte de Derivadores Simulados nos Ambientes da Lagoa Mirim e Pluma da Lagoa dos Patos*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2018.
- Maria Helena Paulo António, Elisa H. Fernandes, and Jose H. Muelbert. Impact of jetty configuration changes on the hydrodynamics of the subtropical patos lagoon estuary, Brazil. *Water (Switzerland)*, 12(11):1–27, 2020. ISSN 20734441. doi: 10.3390/w12113197.
- Inês da Rosa Martins, Jorge Alberto Villwock, Luiz Roberto Martins, and Carlos Emilio Benvenuti. The Lagoa Dos Patos Estuarine Ecosystem (RS, Brazil). *Pesquisas em Geociências*, 22(22):5, 1989. ISSN 1518-2398. doi: 10.22456/1807-9806.21454.
- Lauro J Calliari, R M C Guedes, R F Lélis, J a Antiqueira, and S a Figueiredo. Hazards and risks associated to coastal processes along the southern Brazilian coastline: A synthesis. *Perigos E Riscos Associados A Processos Costeiros No Litoral Sul Do Brasil (RS) Uma Sintese. Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology*, 14(1):51–63, 2010. ISSN 1983-9057. doi: 10.14210/bjast.v14n1.p51-63.
- ELÍRIO TOLDO JR. Morfodinâmica da Laguna dos Patos, Rio Grande do Sul. *Pesquisas em Geociências*, 18(1):58, 1991. ISSN 1518-2398. doi: 10.22456/1807-9806.21362.
- Kazuaki Zen. Corrosion and life cycle management of port structures. *Corrosion Science*, 47(10):2353–2360, 2005. ISSN 0010938X. doi: 10.1016/j.corsci.2005.04.003.
- Áurea M. Ciotti, Clarisse Odebrecht, Gilberto Fillmann, and Osmar O. Moller. Freshwater outflow and Subtropical Convergence influence on phytoplankton biomass on the southern Brazilian continental shelf. *Continental Shelf Research*, 15(14):1737–1756, 1995. ISSN 02784343. doi: 10.1016/0278-4343(94)00091-Z.
- William J Schmitz Jr. On the interbasin-scale thermohaline circulation. *Reviews of Geophysics*, 33(2):151—173, 1995.

- B. J. Hoskins and Kevin I. Hodges. A new perspective on Southern Hemisphere storm tracks. *Journal of Climate*, 18(20):4108–4129, 2005. ISSN 08948755. doi: 10.1175/JCLI3570.1.
- Luiz Brunner de Miranda and Belmiro Mendes de Castro Filho. Aplicação do diagrama T-S estatístico - volumétrico à análise das massas de água da plataforma continental do Rio Grande do Sul. *Boletim do Instituto Oceanográfico*, 28(1):185–200, 1979.
- Juliana Távora, Elisa Helena Fernandes, Liliâne Paranhos Bitencourt, and Priscila Mulattieri Suarez Orozco. El-Niño Southern Oscillation (ENSO) effects on the variability of Patos Lagoon Suspended Particulate Matter. *Regional Studies in Marine Science*, 40:101495, 2020. ISSN 23524855. doi: 10.1016/j.rsma.2020.101495. URL <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2020.101495>.
- Espaciais Instituto Nacional de Pesquisas. *CLIMANÁLISE ESPECIAL - Edição Comemorativa de 10 anos*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Sao Paulo, commemoration edition, 1996.
- Ronaldo Olivera Cavalli, Wilson Wasielesky, Silvio Peixoto, Luís Henrique Da Silva Porsch, Marcos Henrique Silva Santos, and Roberta Borda Soares. Shrimp farming as an alternative to artisanal fishermen communities: The case of Patos Lagoon, Brazil. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 51(5):991–1001, 2008. ISSN 15168913. doi: 10.1590/S1516-89132008000500016.
- Débora Bonden de Oliveira. *Dragagens no Porto do Rio Grande: Um Estudo Sobre Impactos e Conflitos de Uso*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2014.
- Karl F. Nordstrom. Living with shore protection structures: A review. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 150(2):11–23, 2014. ISSN 02727714. doi: 10.1016/j.ecss.2013.11.003. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2013.11.003>.
- William Seabergh. Jetty Spur Functional Design at Coastal Inlets; Effects on Nearshore Circulation and Potential Sediment Movement. *Erdc/Chl Cetn*, 66(February):1–17, 2006.

SEMA. GOVERNO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL Secretaria do Meio Ambiente

- Serviços e Informações - (SEMA). 2010, 2010. URL www.sema.rs.gov.br/sema/jsp/rhcommrim.jsp.

Superintendência do Porto de Rio Grande. PLANO DE DESENVOLVIMENTO E ZONEAMENTO DO PORTO DE RIO GRANDE. Technical report, Superintendência do Porto de Rio Grande, 2017.

Yafei Jia, Sam S Y Wang, and Fellow Yafei Jia, Affiliate, and Sam S. Y. Wang. NUMERICAL MODEL FOR CHANNEL FLOW AND MORPHOLOGICAL CHANGE STUDIES. *Journal Of Hydraulic Engineering*, 125(September):924–933, 1999.

Jose Rodolfo Scarati Martins. *Hidrodinâmica bidimensional: estudo em modelo matemático*. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, Sao Paulo, 1989b.

W. Marques and O.O. Moller. Variabilidade Temporal em Longo Período da Descarga Fluvial e Níveis de Água da Lagoa dos Patos, Rio Grande do Sul, Brasil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 13(3):155–163, 2016. doi: 10.21168/rbrh.v13n3.p155-163.

Ana Cristina Duarte De Aguiar. *A Produção do Espaço Urbano de Rio Grande/RS no Contexto do Polo Naval: uma abordagem política sobre a cidade*. Thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

Eduardo de Paula Kirinus. *Estudo Numérico de Conversão da Energia Cinética das Correntes Marinhas em Energia Elétrica na Plataforma Continental Sul-Sudeste Brasileira*. Tese, Universidade Federal do Rio Grande, 2017.

C. T. Pham, S. Bourban, N. Durand, and M. Turnbull. TELEMAC MODELLING SYSTEM: TELEMAC-3D Software - OPERATING MANUAL. Technical report, EDF, Chateau, France, 2013.

Tingting Zu, Jianping Gan, and Svetlana Y. Erofeeva. Numerical study of the tide and tidal dynamics in the South China Sea. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 55(2):137–154, 2008. ISSN 09670637. doi: 10.1016/j.dsr.2007.10.007.

- Gretchen M Dawson and Shelley H Riedlinger. Use of the Oregon State University Tidal Inversion Software (OTIS) to Generate Improved Tidal Prediction in the East-Asian Seas. Technical Report APRIL 2009, Oceanography Division, 2009.
- Heline Oliveira, Elisa Fernandes, Osmar Junior, and GILBERTO COLLARES. Processos Hidrológicos e Hidrodinâmicos da Lagoa Mirim. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 20(1):34–45, 2015. ISSN 2318-0331. doi: 10.21168/rbrh.v20n1.p34-45.
- Matthew N O Sadiku. *Elementos de eletromagnetismo*. Oxford University Press, New York, bookman edition, 2004. ISBN 9788536302751.
- Giuseppe Pelosi. The finite-element method, Part I: R. L. Courant. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 49(2):180–182, 2007. ISSN 10459243. doi: 10.1109/MAP.2007.376627.
- A. H. Coppola-Owen and Ramon Codina. A finite element model for free surface flows on fixed meshes. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 54(10):1151–1171, 2007. ISSN 02712091. doi: 10.1002/fld.1412.
- Catherine Villaret and Magali Jodeau. Consistency between 2D-3D Sediment Transport models. *Geophysical Research Abstracts*, 19(3):2017–19354, 2017. URL <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2017EGUGA..1919354V/abstract>.
- Sven Smolders, Qilong Bi, Tatiana Maximova, and Joris Vanlede. Modelling Cohesive Sediments in the Scheldt Estuary (Belgium) with SEDI-3D. *Water Quality*, pages 53–60, 2018. URL <https://henry.baw.de/handle/20.500.11970/105195?show=full>.
- E. H.L. Fernandes, K. R. Dyer, O. O. Moller, and L. F.H. Niencheski. The Patos Lagoon hydrodynamics during an El Niño event (1998). *Continental Shelf Research*, 22(11-13): 1699–1713, 2002. ISSN 02784343. doi: 10.1016/S0278-4343(02)00033-X.
- Antonio Raylton Rodrigues Bendô. Identificação de setores com necessidade de dragagem na hidrovia da Lagoa Mirim – RS, Brasil. *Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia*, 5(1):138–147, 2019. doi: 10.26512/ripe.v5i1.19111.

- Elisa Helena Fernandes, Keith Richard Dyer, and Luis Felipe Hax Niencheski. Calibration and Validation of the TELEMAC-2D Model to the Patos Lagoon (Calibration and Validation of the TELEMAC-2D Model to the Patos Lagoon (Brazil). *Source: Journal of Coastal Research*, 1(1991):470–488, 2001.
- Southgate J., Sutherland; D.J.R., Walstrab; T.J., Cheshera; L.C., Van Rijn e H.N. Evaluation of coastal area modelling systems at an estuary mouth. *Coastal Engineering*, 51(2):119–142, 2004. ISSN 03783839. doi: 10.1016/j.coastaleng.2003.12.003.
- Mariana Altenburg Soppa, Ronald Buss de Souza, and Luciano Ponzi Pezzi. Variabilidade das anomalias de temperatura da superfície do mar no oceano atlântico sudoeste e sua relação com o fenômeno El Niño-Oscilação Sul. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 26(3):375–391, 2011. ISSN 1982-4351. doi: 10.1590/s0102-77862011000300005.
- Juarez Viegas, Rita Valéria Andreoli, Mary Toshie Kayano, Luiz Antonio Candido, Rodrigo Augusto Ferreira de Souza, Denisi Holanda Hall, Aline Corrêa de Souza, Samia Regina Garcia, Gleice Guerreiro Temoteo, and Wanda Isabella Diógenes Valentin. Caracterização dos Diferentes Tipos de El Niño e seus Impactos na América do Sul a Partir de Dados Observados e Modelados. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 34(1):43–67, 2019. ISSN 0102-7786. doi: 10.1590/0102-7786334015.
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Climanálise - boletim de monitoramento e análise climática. *CLIMANÁLISE - Boletim de Monitoramento e Análise Climática*, 29-01:48, 2014. doi: 0103-0019.
- Cláudia Klose Parise, Lauro Júlio Calliari, and Nisia Krusche. Extreme storm surges in the south of Brazil: Atmospheric conditions and shore erosion. *Brazilian Journal of Oceanography*, 57(3):175–188, 2009. ISSN 16798759.
- Ana Carolina Vaz, Osmar O. Moller Jr., and Tabajara Lucas De Almeida. Análise quantitativa da descarga dos rios afluentes da Lagoa dos Patos. *Journal of Atlântica*, 28(1):13–24, 2006. doi: 10.5088/atlântica.v28i1.1724.

- Alice M Grimm, Vicente R Barros, and Moira E Doyle. Climate Variability in Southern South America Associated with El Niño and La Niña Events. *JOURNAL OF CLIMATE*, 13:24, 2000.
- C. K. Parise. ESTUDO DA VARIABILIDADE DE ONDAS NO OCEANO ATLÂNTICO SUL E A CONTRIBUIÇÃO ENERGÉTICA DE UM CICLONE EXTRATROPICAL INTENSO NOS ESPECTROS DAS ONDAS AO LARGO DO RIO GRANDE DO SUL, 2010.
- Gustavo S.F. Moller, Evelyn M.L. de M. Novo, and Milton Kampel. Space-time variability of the Amazon River plume based on satellite ocean color. *Continental Shelf Research*, 30(3-4):342–352, 2010. ISSN 02784343. doi: 10.1016/j.csr.2009.11.015. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2009.11.015>.
- O. O. Moller, P. Castaing, J. C. Salomon, and P. Lazure. The influence of local and non-local forcing effects on the subtidal circulation of Patos Lagoon. *Estuaries*, 24(2):297–311, 2001. ISSN 01608347. doi: 10.2307/1352953.
- Osmar O. Möller, Jorge Pablo Castello, and Ana Carolina Vaz. The effect of river discharge and winds on the interannual variability of the pink shrimp *Farfantepenaeus paulensis* production in Patos Lagoon. *Estuaries and Coasts*, 32(4):787–796, 2009. ISSN 15592723. doi: 10.1007/s12237-009-9168-6.
- S. Y. Chao. River-forced estuarine plumes. *Journal of Physical Oceanography*, 18(1):72–88, 1988.
- Milton L Asmus, Paulo Baisch, Graça Baumgarten, E Carlos, Elisa Fernandes, Washington L S Ferreira, Gilberto Filmann, Felipe H Niencheski, Eduardo R Secchi, and Paulo R A Tagliani. Environmental Monitoring Program of the Port of Rio. Technical report, Fundação Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2006.
- L. J. Calliari, J. C. Winterwerp, E. Fernandes, D. Cuchiara, S. B. Vinzon, M. Sperle, and K. T. Holland. Fine grain sediment transport and deposition in the Patos Lagoon-Cassino beach sedimentary system. *Continental Shelf Research*, 29(3):515–529, 2009. ISSN 02784343. doi: 10.1016/j.csr.2008.09.019.

Leo C Van Rijn. Estuarine and coastal sedimentation problems 1. *International Journal*, 20(1): 39–51, 2005.

L J Calliari, U Seeliger, C Odebrecht, and J P Castello. O ambiente ea biota do estuário da Lagoa dos Patos. In J.P. P SEELIGER, U. ODEBRECHT, C., CASTELLO, editor, *Os ecossistemas costeiro e marinho do extremo sul do Brasil (U. Seeliger, C. Odebrecht e JP Castello, eds)*. *Ecoscientia, Rio Grande*, chapter Ecoscienti, pages 13–18. Os ecossistemas costeiro e marinho do extremo sul do Brasil, Rio Grande, ecoscienti edition, 1998.

Felipe André Martelo, Wilian Correia Wiliam Correa Marques, Osmar Olinto Moller Jr, André Felipe Martelo, Wilian Correia Wiliam Correa Marques, and Osmar Olinto Moller Jr. MID TERM SIMULATION OF SUSPENDED SEDIMENT TRANSPORT AND BED EVOLUTION FOR THE PATOS LAGOON ESTUARY. *Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão (ISSN: 2525-4782)*, 4(2):149–159, 2019b. doi: 10.21575/25254782rmetg2019vol4n2792.

John Craske, Antoine L R Debugne, and Maarten van Reeuwijk. Shear-flow dispersion in turbulent jets. *Journal of Fluid Mechanics*, 781:28–51, 2015. ISSN 0022-1120, 1469-7645. doi: 10.1017/jfm.2015.417. URL https://www.cambridge.org/core/product/identifier/S0022112015004176/type/journal_article.