



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE  
INSTITUTO DE OCEANOGRAFIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA FÍSICA,  
QUÍMICA E GEOLÓGICA



# ANÁLISE DE DADOS E DA CIRCULAÇÃO ESTACIONÁRIA NO CANAL DE ACESSO À LAGOA DOS PATOS: SIMULAÇÕES COM MODELOS ANALÍTICOS

Priscila Mulattieri Suarez OROZCO

*Orientador:* Dr. Osmar Olinto MÖLLER Jr.

*Co-orientador:* Dr. Luiz Bruner de MIRANDA

Dissertação apresentada à  
coordenação do  
PPGOFQG como  
requisito parcial para  
obtenção do título de  
mestre

14 de dezembro de 2017

# Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer a minha família por todo o apoio dado ao decorrer da minha vida acadêmica, especialmente ao meu noivo, Mateus, por me dar suporte em todas as minhas decisões e me incentivar nos momentos mais difíceis.

Em segundo lugar, quero agradecer ao eterno amigo e orientador, Osmar, por ter confiado este projeto a mim e em minha pessoa para finalizá-lo. Agradeço também à essencial orientação do Prof. Miranda, que se dispôs quase 24 horas de seu dia para me ajudar e elevou o nível deste trabalho com suas contribuições.

Aos membros da banca, professores Elisa e Marcos, por terem aceitado o nosso convite e por suas críticas, contribuindo para que este trabalho ficasse mais eficiente e conciso.

Aos colegas dos laboratórios LOCOSTE e DINÂMO por toda parceria e ajuda, em especial ao Guia (Rafael) por ter me auxiliado inúmeras vezes no decorrer destes dois anos.

Ao amigo Marco, por mais uma vez ser meu técnico em geoprocessamento favorito e criar os lindos mapas desta dissertação.

À melhor amiga Jordana, por sempre estar do meu lado mesmo a longas distâncias.

Aos meus amigos em geral, gratidão eterna pela companhia, tanto em momentos de desabafo como de alegria.

À CAPES pela bolsa e à FINEP pelo financiamento do projeto REHMANSÁ através do convênio 01.12.0064.00, que também possibilitou minha participação no curso de Hidrodinâmica de Estuários ministrado pelo Dr. Arnoldo Valle-Levinson na Universidade de São Paulo (USP).

# Sumário

<b>Agradecimentos</b>	<b>i</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>iii</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>iv</b>
<b>Lista de Abreviaturas e Símbolos</b>	<b>v</b>
<b>Resumo</b>	<b>ix</b>
<b>Abstract</b>	<b>x</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 Área de Estudo . . . . .	7
<b>2 OBJETIVOS</b>	<b>12</b>
2.1 Objetivos Específicos . . . . .	12
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>13</b>
3.1 Dados de Campo . . . . .	13
3.1.1 Velocidade e Direção de Correntes . . . . .	14
3.1.2 Velocidade e Direção do Vento . . . . .	16
3.1.3 Salinidade . . . . .	18

---

3.1.4	Descarga Fluvial . . . . .	20
3.2	Ciclos de Enchente-Vazante . . . . .	21
3.2.1	Classificação segundo o Diagrama Estratificação-circulação de HANSEN & RATTRAY (1966) . . . . .	23
3.3	Modelos Analíticos . . . . .	25
3.3.1	Determinação da Qualidade das Simulações . . . . .	26
3.3.2	Modelos Analíticos de Circulação Estuarina . . . . .	28
	a) Condição de Contorno Superior . . . . .	29
	b) Condição de Contorno Inferior . . . . .	30
	c) Solução Hidrodinâmica – Atrito Máximo . . . . .	31
	d) Solução Hidrodinâmica – Atrito Moderado . . . . .	32
3.3.3	Quantificação das Magnitudes das Forçantes . . . . .	33
3.3.4	Média dos Valores dos Parâmetros de Entrada dos Modelos Analíticos . . . . .	33
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>36</b>
4.1	Análises Hidrográficas dos Dados de Campo . . . . .	36
4.1.1	Séries Temporais . . . . .	36
4.1.2	Análises Estatísticas . . . . .	43
	4.1.2.1 Descarga Fluvial . . . . .	44
	4.1.2.2 Velocidade do Vento . . . . .	46
	4.1.2.3 Velocidade da Corrente Longitudinal ao Canal In- tegrada Verticalmente . . . . .	52
	4.1.2.4 Salinidade na Superfície e no Fundo . . . . .	56
4.2	Descrição dos Ciclos de Enchente-Vazante . . . . .	61
	4.2.1 Descarga Fluvial Baixa . . . . .	61
	4.2.1.1 Ciclo de Enchente-Vazante de 25 a 30 de outubro de 2006 . . . . .	61

---

4.2.1.2	Ciclo de Enchente-Vazante de 7 a 12 de janeiro de 2009 . . . . .	67
4.2.2	Descarga Fluvial Média . . . . .	72
4.2.2.1	Ciclo de Enchente-Vazante de 3 a 8 de abril de 2007	72
4.2.2.2	Ciclo de Enchente-Vazante de 12 a 17 de agosto de 2008 . . . . .	78
4.2.2.3	Ciclo de Enchente-Vazante de 14 a 22 de novembro de 2011 . . . . .	83
4.2.3	Descarga Fluvial Alta . . . . .	89
4.2.3.1	Ciclo de Enchente-Vazante de 9 a 14 de outubro de 2005 . . . . .	89
4.2.3.2	Ciclo de Enchente-Vazante de 19 a 24 de agosto de 2010 . . . . .	95
4.3	Simulações Teóricas dos Perfis Estacionários de Velocidade e Salinidade . . . . .	100
4.3.1	Descarga Fluvial Baixa . . . . .	100
4.3.1.1	Ciclo de Enchente-Vazante de 25 a 30 de outubro de 2006 . . . . .	100
4.3.1.2	Ciclo de Enchente-Vazante de 7 a 12 de janeiro de 2009 . . . . .	103
4.3.2	Descarga Fluvial Média . . . . .	107
4.3.2.1	Ciclo de Enchente-Vazante de 3 a 8 de abril de 2007	107
4.3.2.2	Ciclo de Enchente-Vazante de 12 a 17 de agosto de 2008 . . . . .	111
4.3.2.3	Ciclo de Enchente-Vazante de 14 a 22 de novembro de 2011 . . . . .	114
4.3.3	Descarga Fluvial Alta . . . . .	118

---

4.3.3.1	Ciclo de Enchente-Vazante de 9 a 14 de outubro de 2005 . . . . .	118
4.3.3.2	Ciclo de Enchente-Vazante de 19 a 24 de agosto de 2010 . . . . .	121
4.3.4	Forçantes dos Perfis Estacionários de Velocidade e Salinidade	125
<b>5</b>	<b>DISCUSSÃO</b>	<b>130</b>
5.1	Ánalises Hidrográficas . . . . .	130
5.2	Ciclos de Enchente-Vazante e Simulações Teóricas . . . . .	133
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>140</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>143</b>

# Lista de Figuras

1	Mapa do estuário da Lagoa dos Patos, dando ênfase para o Canal de Acesso ao Porto do Rio Grande (CA) e para a localização do ponto de fundeio do ADP e dos CTs (ADP/CTs). . . . .	3
2	Esquema de oscilação de nível longitudinal à Lagoa dos Patos em condições de (a) ventos de NE e (b) ventos de SO. Adaptado de MÖLLER <i>et al.</i> (2001). . . . .	10
3	Sistema de coordenadas Ox,y,z, onde o eixo Ox é transversal ao canal do estuário e positivo para leste, correspondente ao componente $u$ de velocidade; o eixo Oy é longitudinal ao canal e positivo para o norte, correspondente ao componente $v$ de velocidade (enchente, $v > 0$ e vazante, $v < 0$ ); e o eixo Oz é vertical ao canal e orientado positivamente no sentido da aceleração da gravidade, correspondente ao componente $w$ de velocidade e $a = a(y, z)$ e $b = b(y, z)$ denotam as margens leste e oeste, respectivamente; $H_0$ é a profundidade da superfície livre de repouso com fundo plano e $\eta = \eta(y, z)$ é a inclinação da superfície livre. Adaptado de MIRANDA <i>et al.</i> (2002; 2012). . . . .	15

---

4	Análise espectral dos dados originais (azul) e filtrados (vermelho) de velocidade de corrente, indicando o período das principais componentes harmônicas da maré do estuário ( $M_4 = \sim 6,2$ h; $M_2 = \sim 12,6$ h; $O_1 = \sim 25,8$ h). . . . .	16
5	Análise espectral dos dados originais (azul) e filtrados (vermelho) de velocidade do vento paralelo ao canal ( $V$ ), indicando o período da brisa marítima ( $\sim 24$ h). . . . .	17
6	Análise espectral dos dados originais (azul) e filtrados (vermelho) de salinidade no fundo, indicando o período dos componentes harmônicas da maré $M_2 = \sim 12,6$ h e $O_1 = \sim 25,8$ h. O sinal do componente $M_4$ foi praticamente nulo. . . . .	19
7	Série temporal dos dados <b>(a)</b> originais e <b>(b)</b> filtrados de salinidade na superfície (azul) e no fundo (vermelho) de um ciclo de enchente-vazante do ano de 2006. . . . .	20
8	Série temporal de descarga fluvial dos anos de 2005 a 2009. . . . .	37
9	Série temporal de descarga fluvial dos anos de 2010 a 2011. . . . .	39
10	Séries temporais dos anos de 2005 a 2009 de <b>(a)</b> velocidade do componente $V$ do vento, <b>(b)</b> velocidade do componente $v$ da corrente integrada verticalmente, <b>(c)</b> salinidade na superfície e <b>(d)</b> salinidade no fundo. $V > 0$ e $V < 0$ representam velocidades de ventos de S e de N, e $v > 0$ e $v < 0$ as velocidades de enchente e de vazante, respectivamente. . . . .	41

---

11	Séries temporais dos anos de 2010 a 2011 de <b>(a)</b> velocidade do componente $V$ do vento, <b>(b)</b> velocidade do componente $v$ da corrente integrada verticalmente, <b>(c)</b> salinidade na superfície e <b>(d)</b> salinidade no fundo. $V > 0$ e $V < 0$ representam velocidades de ventos de S e de N, e $v > 0$ e $v < 0$ as velocidades de enchente e de vazante, respectivamente. . . . .	43
12	Distribuição de frequência da descarga fluvial para todo o período de estudo. . . . .	44
13	Médias mensais da descarga fluvial para todo o período de estudo. .	45
14	Anomalias mensais de descarga fluvial no entorno da média geral ( $1.450 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) e considerando todo o período de estudo. . . . .	46
15	Rosa dos ventos dos anos de <b>(a)</b> 2005, <b>(b)</b> 2006, <b>(c)</b> 2007 e <b>(d)</b> 2008. As intensidades estão em $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ e as porcentagens representam as frequências acumuladas de cada direção. . . . .	47
16	Rosa dos ventos dos anos de <b>(a)</b> 2009, <b>(b)</b> 2010 e <b>(c)</b> 2011. As intensidades estão em $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ e as porcentagens representam as frequências acumuladas de cada direção. . . . .	48
17	Distribuição de frequência das direções do vento para todo o período de estudo. . . . .	49
18	Distribuição de frequência da velocidade do vento longitudinal à costa para todo o período de estudo. Valores positivos e negativos representam velocidades de ventos de SO e de NE, respectivamente.	50
19	Médias mensais da velocidade do vento paralelo à costa (direções NE e SO) para todo o período de estudo. . . . .	51
20	Anomalias mensais da velocidade do vento paralelo à costa no entorno das médias nas direções NE ( $-5,17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) e SO ( $3,36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) considerando todo o período de estudo. . . . .	52

---

21	Distribuição de frequência da velocidade do componente $v$ da corrente (integrado verticalmente) para todo o período de estudo. $v > 0$ e $v < 0$ representam movimentos de enchente e de vazante, respectivamente. . . . .	54
22	Médias mensais da velocidade do componente $v$ da corrente (integrado verticalmente) nas direções de enchente e vazante considerando todo o período de estudo. . . . .	55
23	Anomalias mensais da velocidade do componente $v$ da corrente (integrada verticalmente) nas direções de enchente (média = 0,13 m.s <sup>-1</sup> ) e de vazante (média = -0,18 m.s <sup>-1</sup> ) considerando todo o período de estudo. . . . .	56
24	Distribuição de frequência da salinidade na superfície e no fundo para todo o período de estudo. . . . .	58
25	Médias mensais da salinidade na superfície e no fundo para todo o período de estudo. . . . .	59
26	Anomalias mensais da salinidade na superfície (média = 15,1 ‰) e no fundo (média = 18,7 ‰) considerando todo o período de estudo. . . . .	59
27	Médias mensais da distribuição de frequência dos tipos de estuário (bem misturado e parcialmente misturado) considerando todo o período de estudo. . . . .	61
28	(a) Variação temporal da velocidade do vento paralelo à costa resultante da passagem do sistema frontal no período de 25 a 30 de outubro de 2006. Valores positivos e negativos indicam ventos de SO e NE, respectivamente. (b) Variação local do componente de velocidade $v$ forçada pelo sistema frontal. Valores $v > 0$ e $v < 0$ indicam movimentos de enchente e vazante, respectivamente. . . . .	62

- 
- 29 Série temporal do componente de velocidade  $v$  (azul) e de salinidade (vermelho) na superfície da coluna d'água durante o ciclo de enchente-vazante que cobriu o período entre 25 a 30 de outubro de 2006. Valores  $v > 0$  e  $v < 0$  indicam movimentos de enchente e vazante, respectivamente. . . . . 64
- 30 Série temporal do componente de velocidade  $v$  (azul) e de salinidade (vermelho) no fundo da coluna d'água durante o ciclo de enchente-vazante que cobriu o período entre 25 a 30 de outubro de 2006. Valores  $v > 0$  e  $v < 0$  indicam movimentos de enchente e vazante, respectivamente. . . . . 65
- 31 Perfil vertical médio do componente de velocidade  $v$  correspondente ao ciclo de enchente-vazante de 25 a 30 de outubro de 2006. As barras horizontais representam o desvio padrão de velocidade por profundidade. Valores  $v > 0$  e  $v < 0$  indicam movimentos de enchente e vazante, respectivamente. . . . . 66
- 32 Diagrama Estratificação-circulação segundo HANSEN & RATTRAY (1966) correspondente ao ciclo de enchente-vazante de 25 a 30 de outubro de 2006. O parâmetro circulação no eixo das abscissas é definido como  $v_s/v_f$  e o parâmetro estratificação no eixo das ordenadas é definido como  $\delta S/\bar{s}$ . Em azul: curva paramétrica do número adimensional  $\nu$ . . . . . 66
- 33 (a) Variação temporal da velocidade do vento paralelo à costa resultante da passagem do sistema frontal no período de 7 a 12 de janeiro de 2009. Valores positivos e negativos indicam ventos de SO e NE, respectivamente. (b) Variação local do componente de velocidade  $v$  forçada pelo sistema frontal. Valores  $v > 0$  e  $v < 0$  indicam movimentos de enchente e vazante, respectivamente. . . . . 68

- 34 Série temporal do componente de velocidade  $v$  (azul) e de salinidade (vermelho) na superfície da coluna d'água durante o ciclo de enchente-vazante que cobriu o período entre 7 a 12 de janeiro de 2009. Valores  $v > 0$  e  $v < 0$  indicam movimentos de enchente e vazante, respectivamente. . . . . 69
- 35 Série temporal do componente de velocidade  $v$  (azul) e de salinidade (vermelho) no fundo da coluna d'água durante o ciclo de enchente-vazante que cobriu o período entre 7 a 12 de janeiro de 2009. Valores  $v > 0$  e  $v < 0$  indicam movimentos de enchente e vazante, respectivamente. . . . . 70
- 36 Perfil vertical médio do componente de velocidade  $v$  correspondente ao ciclo de enchente-vazante de 7 a 12 de janeiro de 2009. As barras horizontais representam o desvio padrão de velocidade por profundidade. Valores  $v > 0$  e  $v < 0$  indicam movimentos de enchente e vazante, respectivamente. . . . . 71
- 37 Diagrama Estratificação-circulação segundo HANSEN & RATTRAY (1966) correspondente ao ciclo de enchente-vazante de 7 a 12 de janeiro de 2009. O parâmetro circulação no eixo das abscissas é definido como  $v_s/v_f$  e o parâmetro estratificação no eixo das ordenadas é definido como  $\delta S/\bar{s}$ . Em azul: curva paramétrica do número adimensional  $\nu$ . . . . . 72
- 38 (a) Variação temporal da velocidade do vento paralelo à costa resultante da passagem do sistema frontal no período de 3 a 8 de abril de 2007. Valores positivos e negativos indicam ventos de SO e NE, respectivamente. (b) Variação local do componente de velocidade  $v$  forçada pelo sistema frontal. Valores  $v > 0$  e  $v < 0$  indicam movimentos de enchente e vazante, respectivamente. . . . . 73

- 39 Série temporal do componente de velocidade  $v$  (azul) e de salinidade (vermelho) na superfície da coluna d'água durante o ciclo de enchente-vazante que cobriu o período entre 3 a 8 de abril de 2007. Valores  $v > 0$  e  $v < 0$  indicam movimentos de enchente e vazante, respectivamente. . . . . 75
- 40 Série temporal do componente de velocidade  $v$  (azul) e de salinidade (vermelho) no fundo da coluna d'água durante o ciclo de enchente-vazante que cobriu o período entre 3 a 8 de abril de 2007. Valores  $v > 0$  e  $v < 0$  indicam movimentos de enchente e vazante, respectivamente. 76
- 41 Perfil vertical médio do componente de velocidade  $v$  correspondente ao ciclo de enchente-vazante de 3 a 8 de abril de 2007. As barras horizontais representam o desvio padrão de velocidade por profundidade. Valores  $v > 0$  e  $v < 0$  indicam movimentos de enchente e vazante, respectivamente. . . . . 77
- 42 Diagrama Estratificação-circulação segundo HANSEN & RATTRAY (1966) correspondente ao ciclo de enchente-vazante de 3 a 8 de abril de 2007. O parâmetro circulação no eixo das abscissas é definido como  $v_s/v_f$  e o parâmetro estratificação no eixo das ordenadas é definido como  $\delta S/\bar{s}$ . Em azul: curva paramétrica do número adimensional  $\nu$ . . . . . 77
- 43 (a) Variação temporal da velocidade do vento paralelo à costa resultante da passagem do sistema frontal no período de 12 a 17 de agosto de 2008. Valores positivos e negativos indicam ventos de SO e NE, respectivamente. (b) Variação local do componente de velocidade  $v$  forçada pelo sistema frontal. Valores  $v > 0$  e  $v < 0$  indicam movimentos de enchente e vazante, respectivamente. . . . . 79

- 
- 44 Série temporal do componente de velocidade  $v$  (azul) e de salinidade (vermelho) na superfície da coluna d'água durante o ciclo de enchente-vazante que cobriu o período entre 12 a 17 de agosto de 2008. Valores  $v > 0$  e  $v < 0$  indicam movimentos de enchente e vazante, respectivamente. . . . . 80
- 45 Série temporal do componente de velocidade  $v$  (azul) e de salinidade (vermelho) no fundo da coluna d'água durante o ciclo de enchente-vazante que cobriu o período entre 12 a 17 de agosto de 2008. Valores  $v > 0$  e  $v < 0$  indicam movimentos de enchente e vazante, respectivamente. . . . . 81
- 46 Perfil vertical médio do componente de velocidade  $v$  correspondente ao ciclo de enchente-vazante de 12 a 17 de agosto de 2008. As barras horizontais representam o desvio padrão de velocidade por profundidade. Valores  $v > 0$  e  $v < 0$  indicam movimentos de enchente e vazante, respectivamente. . . . . 82
- 47 Diagrama Estratificação-circulação segundo HANSEN & RATTRAY (1966) correspondente ao ciclo de enchente-vazante de 12 a 17 de agosto de 2008. O parâmetro circulação no eixo das abscissas é definido como  $v_s/v_f$  e o parâmetro estratificação no eixo das ordenadas é definido como  $\delta S/\bar{s}$ . Em azul: curva paramétrica do número adimensional  $\nu$ . . . . . 83
- 48 (a) Variação temporal da velocidade do vento paralelo à costa resultante da passagem do sistema frontal no período de 14 a 22 de novembro de 2011. Valores positivos e negativos indicam ventos de SO e NE, respectivamente. (b) Variação local do componente de velocidade  $v$  forçada pelo sistema frontal. Valores  $v > 0$  e  $v < 0$  indicam movimentos de enchente e vazante, respectivamente. . . . . 84

- 49 Série temporal do componente de velocidade  $v$  (azul) e de salinidade (vermelho) na superfície da coluna d'água durante o ciclo de enchente-vazante que cobriu o período entre 14 a 22 de novembro de 2011. Valores  $v > 0$  e  $v < 0$  indicam movimentos de enchente e vazante, respectivamente. . . . . 86
- 50 Série temporal do componente de velocidade  $v$  (azul) e de salinidade (vermelho) no fundo da coluna d'água durante o ciclo de enchente-vazante que cobriu o período entre 14 a 22 de novembro de 2011. Valores  $v > 0$  e  $v < 0$  indicam movimentos de enchente e vazante, respectivamente. . . . . 87
- 51 Perfil vertical médio do componente de velocidade  $v$  correspondente ao ciclo de enchente-vazante de 14 a 22 de novembro de 2011. As barras horizontais representam o desvio padrão de velocidade por profundidade. Valores  $v > 0$  e  $v < 0$  indicam movimentos de enchente e vazante, respectivamente. . . . . 88
- 52 Diagrama Estratificação-circulação segundo HANSEN & RATTRAY (1966) correspondente ao ciclo de enchente-vazante de 14 a 22 de novembro de 2011. O parâmetro circulação no eixo das abscissas é definido como  $v_s/v_f$  e o parâmetro estratificação no eixo das ordenadas é definido como  $\delta S/\bar{s}$ . Em azul: curva paramétrica do número adimensional  $\nu$ . . . . . 88
- 53 (a) Variação temporal da velocidade do vento paralelo à costa resultante da passagem do sistema frontal no período de 9 a 14 de outubro de 2005. Valores positivos e negativos indicam ventos de SO e NE, respectivamente. (b) Variação local do componente de velocidade  $v$  forçada pelo sistema frontal. Valores  $v > 0$  e  $v < 0$  indicam movimentos de enchente e vazante, respectivamente. . . . . 90

- 54 Série temporal do componente de velocidade  $v$  (azul) e de salinidade (vermelho) na superfície da coluna d'água durante o ciclo de enchente-vazante que cobriu o período entre 9 a 14 de outubro de 2005. Valores  $v > 0$  e  $v < 0$  indicam movimentos de enchente e vazante, respectivamente. . . . . 91
- 55 Série temporal do componente de velocidade  $v$  (azul) e de salinidade (vermelho) no fundo da coluna d'água durante o ciclo de enchente-vazante que cobriu o período entre 9 a 14 de outubro de 2005. Valores  $v > 0$  e  $v < 0$  indicam movimentos de enchente e vazante, respectivamente. . . . . 93
- 56 Perfil vertical médio do componente de velocidade  $v$  correspondente ao ciclo de enchente-vazante de 9 a 14 de outubro de 2005. As barras horizontais representam o desvio padrão de velocidade por profundidade. Valores  $v < 0$  indicam movimentos de vazante. . . . . 94
- 57 Diagrama Estratificação-circulação segundo HANSEN & RATTRAY (1966) correspondente ao ciclo de enchente-vazante de 9 a 14 de outubro de 2005. O parâmetro circulação no eixo das abscissas é definido como  $v_s/v_f$  e o parâmetro estratificação no eixo das ordenadas é definido como  $\delta S/\bar{s}$ . Em azul: curva paramétrica do número adimensional  $\nu$ . . . . . 94
- 58 (a) Variação temporal da velocidade do vento paralelo à costa resultante da passagem do sistema frontal no período de 19 a 24 de agosto de 2010. Valores positivos e negativos indicam ventos de SO e NE, respectivamente. (b) Variação local do componente de velocidade  $v$  forçada pelo sistema frontal. Valores  $v > 0$  e  $v < 0$  indicam movimentos de enchente e vazante, respectivamente. . . . . 96

- 59 Série temporal do componente de velocidade  $v$  (azul) e de salinidade (vermelho) na superfície da coluna d'água durante o ciclo de enchente-vazante que cobriu o período entre 19 a 24 de agosto de 2010. Valores  $v > 0$  e  $v < 0$  indicam movimentos de enchente e vazante, respectivamente. . . . . 97
- 60 Série temporal do componente de velocidade  $v$  (azul) e de salinidade (vermelho) no fundo da coluna d'água durante o ciclo de enchente-vazante que cobriu o período entre 19 a 24 de agosto de 2010. Valores  $v > 0$  e  $v < 0$  indicam movimentos de enchente e vazante, respectivamente. . . . . 98
- 61 Perfil vertical médio do componente de velocidade  $v$  correspondente ao ciclo de enchente-vazante de 19 a 24 de agosto de 2010. As barras horizontais representam o desvio padrão de velocidade por profundidade. Valores  $v > 0$  e  $v < 0$  indicam movimentos de enchente e vazante, respectivamente. . . . . 99
- 62 Perfil estacionário do componente de velocidade  $v$  observado (Observação) e simulado através da solução hidrodinâmica com atrito moderado (Teoria). Skill = 1 indica um ajuste perfeito entre valores observados e simulados. Perfil referente ao ciclo de enchente-vazante de 25 a 30 de outubro de 2006. Valores  $v < 0$  e  $v > 0$  indicam movimentos de vazante e de enchente, respectivamente. . . . . 101
- 63 Perfil estacionário de salinidade simulado através da solução hidrodinâmica com atrito moderado. Skill = 1 indica um ajuste perfeito entre valores observados (“S(dados)”) e simulados na superfície e no fundo da coluna d'água. Perfil referente ao ciclo de enchente-vazante de 25 a 30 de outubro de 2006. . . . . 102

- 
- 64 Perfil estacionário do componente de velocidade  $v$  observado (Observação) e simulado através da solução hidrodinâmica com atrito moderado (Teoria). Skill = 1 indica um ajuste perfeito entre valores observados e simulados. Perfil referente ao ciclo de enchente-vazante de 7 a 12 de janeiro de 2009. Valores  $v < 0$  e  $v > 0$  indicam movimentos de vazante e de enchente, respectivamente. . . . . 104
- 65 Perfil estacionário de salinidade simulado através da solução hidrodinâmica com atrito moderado. Skill = 1 indica um ajuste perfeito entre valores observados (“S(dados)”) e simulados na superfície e no fundo da coluna d’água. Perfil referente ao ciclo de enchente-vazante de 7 a 12 de janeiro de 2009. . . . . 106
- 66 Perfil estacionário do componente de velocidade  $v$  observado (Observação) e simulado através da solução hidrodinâmica com atrito moderado (Teoria). Skill = 1 indica um ajuste perfeito entre valores observados e simulados. Perfil referente ao ciclo de enchente-vazante de 3 a 8 de abril de 2007. Valores  $v < 0$  e  $v > 0$  indicam movimentos de vazante e de enchente, respectivamente. . . . . 108
- 67 Perfil estacionário de salinidade simulado através da solução hidrodinâmica com atrito moderado. Skill = 1 indica um ajuste perfeito entre valores observados (“S(dados)”) e simulados na superfície e no fundo da coluna d’água. Perfil referente ao ciclo de enchente-vazante de 3 a 8 de abril de 2007. . . . . 110

- 
- 68 Perfil estacionário do componente de velocidade  $v$  observado (Observação) e simulado através da solução hidrodinâmica com atrito moderado (Teoria). Skill = 1 indica um ajuste perfeito entre valores observados e simulados. Perfil referente ao ciclo de enchente-vazante de 12 a 17 de agosto de 2008. Valores  $v < 0$  e  $v > 0$  indicam movimentos de vazante e de enchente, respectivamente. . . . . 112
- 69 Perfil estacionário de salinidade simulado através da solução hidrodinâmica com atrito moderado. Skill = 1 indica um ajuste perfeito entre valores observados (“S(dados)”) e simulados na superfície e no fundo da coluna d’água. Perfil referente ao ciclo de enchente-vazante de 12 a 17 de agosto de 2008. . . . . 113
- 70 Perfil estacionário do componente de velocidade  $v$  observado (Observação) e simulado através da solução hidrodinâmica com atrito moderado (Teoria). Skill = 1 indica um ajuste perfeito entre valores observados e simulados. Perfil referente ao ciclo de enchente-vazante de 14 a 22 de novembro de 2011. Valores  $v < 0$  e  $v > 0$  indicam movimentos de vazante e de enchente, respectivamente. . . . . 115
- 71 Perfil estacionário de salinidade simulado através da solução hidrodinâmica com atrito moderado. Skill = 1 indica um ajuste perfeito entre valores observados (“S(dados)”) e simulados na superfície e no fundo da coluna d’água. Perfil referente ao ciclo de enchente-vazante de 14 a 22 de novembro de 2011. . . . . 117

- 
- 72 Perfil estacionário do componente de velocidade  $v$  observado (Observação) e simulado através da solução hidrodinâmica com atrito moderado (Teoria). Skill = 1 indica um ajuste perfeito entre valores observados e simulados. Perfil referente ao ciclo de enchente-vazante de 9 a 14 de outubro de 2005. Valores  $v < 0$  e  $v > 0$  indicam movimentos de vazante e de enchente, respectivamente. . . . . 119
- 73 Perfil estacionário de salinidade simulado através da solução hidrodinâmica com atrito moderado. Skill = 1 indica um ajuste perfeito entre valores observados (“S(dados)”) e simulados na superfície e no fundo da coluna d’água. Perfil referente ao ciclo de enchente-vazante de 9 a 14 de outubro de 2005. . . . . 120
- 74 Perfil estacionário do componente de velocidade  $v$  observado (Observação) e simulado através da solução hidrodinâmica com atrito moderado (Teoria). Skill = 1 indica um ajuste perfeito entre valores observados e simulados. Perfil referente ao ciclo de enchente-vazante de 19 a 24 de agosto de 2010. Valores  $v < 0$  e  $v > 0$  indicam movimentos de vazante e de enchente, respectivamente. . . . . 122
- 75 Perfil estacionário de salinidade simulado através da solução hidrodinâmica com atrito moderado. Skill = 1 indica um ajuste perfeito entre valores observados (“S(dados)”) e simulados na superfície e no fundo da coluna d’água. Perfil referente ao ciclo de enchente-vazante de 19 a 24 de agosto de 2010. . . . . 124
- 76 Índices mensais do fenômeno El Niño-Oscilação Sul (IOS) para o período de estudo deste trabalho. Os limites entre  $\text{IOS} = -7$  e  $\text{IOS} = 7$  (linhas pontilhadas) indicam anos classificados como neutros, enquanto que  $\text{IOS} < -7$  e  $\text{IOS} > 7$  representam anos de El Niño e La Niña, respectivamente. . . . . 131

# Lista de Tabelas

1	Falhas temporais nos dados de salinidade durante o período de estudo (17 de agosto de 2005 a 31 de dezembro de 2011) na superfície e no fundo da coluna de água. . . . .	18
2	Classificação dos anos de estudo quanto à sua respectiva descarga fluvial média nas intensidades “BAIXA”, “MÉDIA” e “ALTA”. . . .	22
3	Qualificações quanto ao valor do índice RMAE segundo WALSTRA <i>et. al.</i> (2001). . . . .	27
4	Parâmetros de entrada dos modelos constantes em todas simulações.	34
5	Valores médios dos parâmetros de entrada dos modelos ao longo de todos ciclos de enchente-vazante. . . . .	35
6	Médias, porcentagem de ocorrência e valores máximos dos dados de velocidade do componente $v$ da corrente (integrada verticalmente) para todo período de estudo. “Ench.” e “Vaz.” representam as direções de enchente e vazante, respectivamente. . . . .	53
7	Médias, desvio padrão e valores máximos dos dados de salinidade na superfície (“Sup.”) e no fundo (“Fun.”) para todo o período de estudo. . . . .	57

- 
- 8 Fração de tempo em que o estuário foi classificado como tipo bem misturado e parcialmente misturado considerando todo o período de estudo. A separação dos dois tipos foi feita com base na diferença de salinidade entre a superfície e o fundo ( $\delta S$ ) conforme classificação de PRITCHARD (1989). . . . . 60
- 9 Parâmetros livres e os obtidos através dos dados de campo (\*) utilizados nas simulações dos perfis estacionários do componente de velocidade  $v$  e de salinidade que resultaram no maior valor de Skill. Valores referentes ao ciclo de enchente-vazante de 25 a 30 de outubro de 2006. . . . . 102
- 10 Limites superiores e inferiores dos coeficientes  $N_z$  e  $K_z$  correspondentes a um valor de Skill igual à 0,50, mantendo fixo os valores de  $K_z$  e  $N_z$ , respectivamente, pertencentes à Tabela 9. Limites referentes ao ciclo de enchente-vazante de 25 a 30 de outubro de 2006. . 103
- 11 Parâmetros livres e os obtidos através dos dados de campo (\*) utilizados nas simulações dos perfis estacionários do componente de velocidade  $v$  e de salinidade que resultaram no maior valor de Skill. Valores referentes ao ciclo de enchente-vazante de 7 a 12 de janeiro de 2009. . . . . 105
- 12 Limites superiores e inferiores dos coeficientes  $N_z$  e  $K_z$  correspondentes a um valor de Skill igual à 0,50, mantendo fixo os valores de  $K_z$  e  $N_z$ , respectivamente, pertencentes à Tabela 11. Limites referentes ao ciclo de enchente-vazante de 7 a 12 de janeiro de 2009. 107

- 
- 13 Parâmetros livres e os obtidos através dos dados de campo (\*) utilizados nas simulações dos perfis estacionários do componente de velocidade  $v$  e de salinidade que resultaram no maior valor de Skill. Valores referentes ao ciclo de enchente-vazante de 3 a 8 de abril de 2007. . . . . 109
- 14 Limites superiores e inferiores dos coeficientes  $N_z$  e  $K_z$  correspondentes a um valor de Skill igual à 0,50, mantendo fixo os valores de  $K_z$  e  $N_z$ , respectivamente, pertencentes à Tabela 13. Limites referentes ao ciclo de enchente-vazante de 3 a 8 de abril de 2007. . . 110
- 15 Parâmetros livres e os obtidos através dos dados de campo (\*) utilizados nas simulações dos perfis estacionários do componente de velocidade  $v$  e de salinidade que resultaram no maior valor de Skill. Valores referentes ao ciclo de enchente-vazante de 12 a 17 de agosto de 2008. . . . . 113
- 16 Limites superiores e inferiores dos coeficientes  $N_z$  e  $K_z$  correspondentes a um valor de Skill igual à 0,50, mantendo fixo os valores de  $K_z$  e  $N_z$ , respectivamente, pertencentes à Tabela 15. Limites referentes ao ciclo de enchente-vazante de 12 a 17 de agosto de 2008. 114
- 17 Parâmetros livres e os obtidos através dos dados de campo (\*) utilizados nas simulações dos perfis estacionários do componente de velocidade  $v$  e de salinidade que resultaram no maior valor de Skill. Valores referentes ao ciclo de enchente-vazante de 14 a 22 de novembro de 2011. . . . . 116

- 
- 18 Limites superiores e inferiores dos coeficientes  $N_z$  e  $K_z$  correspondentes a um valor de Skill igual à 0,50, mantendo fixo os valores de  $K_z$  e  $N_z$ , respectivamente, pertencentes à Tabela 17. Limites referentes ao ciclo de enchente-vazante de 14 a 22 de novembro de 2011. . . . . 117
- 19 Parâmetros livres e os obtidos através dos dados de campo (\*) utilizados nas simulações dos perfis estacionários do componente de velocidade  $v$  e de salinidade que resultaram no maior valor de Skill. Valores referentes ao ciclo de enchente-vazante de 9 a 14 de outubro de 2005. . . . . 120
- 20 Limites superiores e inferiores dos coeficientes  $N_z$  e  $K_z$  correspondentes a um valor de Skill igual à 0,50, mantendo fixo os valores de  $K_z$  e  $N_z$ , respectivamente, pertencentes à Tabela 19. Limites referentes ao ciclo de enchente-vazante de 9 a 14 de outubro de 2005. 121
- 21 Parâmetros livres e os obtidos através dos dados de campo (\*) utilizados nas simulações dos perfis estacionários do componente de velocidade  $v$  e de salinidade que resultaram no maior valor de Skill. Valores referentes ao ciclo de enchente-vazante de 19 a 24 de agosto de 2010. . . . . 123
- 22 Limites superiores e inferiores dos coeficientes  $N_z$  e  $K_z$  correspondentes a um valor de Skill igual à 0,50, mantendo fixo os valores de  $K_z$  e  $N_z$ , respectivamente, pertencentes à Tabela 21. Limites referentes ao ciclo de enchente-vazante de 19 a 24 de agosto de 2010. 125

- 
- 23 Magnitudes médias das forçantes gradiente longitudinal de densidade ( $\partial\bar{\rho}/\partial y$ ), descarga fluvial ( $v_f$ ) e tensão de cisalhamento do vento ( $\tau_{W_y}$ ) nos perfis estacionários do componente de velocidade  $v$  e de salinidade, correspondentes aos anos de 2006, 2009, 2007, 2008 e 2011. . . . . 126
- 24 Magnitudes médias das forçantes gradiente longitudinal de densidade ( $\partial\bar{\rho}/\partial y$ ), descarga fluvial ( $v_f$ ) e tensão de cisalhamento do vento ( $\tau_{W_y}$ ) nos perfis estacionários do componente de velocidade  $v$  e de salinidade, correspondentes aos anos de 2005 e 2010. . . . . 127

# Lista de Abreviaturas e Símbolos

<i>ADP</i>	<i>Acoustic Doppler Profiler</i>
<i>ANA</i>	Agência Nacional de Águas
<i>ACAS</i>	Água Central do Atlântico Sul
<i>ASTP</i>	Água Subtropical de Plataforma
<i>AT</i>	Água Tropical
<i>CA</i>	Canal de Acesso ao Porto de Rio Grande
<i>CTs</i>	termo-condutivímetros
<i>RMAE</i>	<i>Root Mean Absolut Error</i>
<i>RMSE</i>	<i>Relative Mean Square Error</i>
$\langle \rangle$	média temporal
$a = a(y, z)$	coordenada da margem leste
$a$	amplitude da onda de maré
$b = b(y, z)$	coordenada da margem oeste
$B[B = a(y, z) - b(y, z)]$	largura do estuário (m)
$\beta$	coeficiente de contração salina médio ( $\approx 7,0 \times 10^{-4}$ )
$\partial\rho/\partial y$	gradiente longitudinal de densidade ( $\text{kg.m}^{-4}$ )
$\delta S$	diferença entre os valores estacionários das salinidades no fundo ( $S_f$ ) e na superfície ( $S_s$ )

$\eta = \eta(y, z)$	inclinação da superfície livre (m)
$C_D$	coeficiente de arrasto do vento
$F$	Fator de Forma; $F = (O_1 + K_1)/M_2 + S_2$
$g$	gravidade constante ( $9,8 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )
$h(y, t)$	variação longitudinal da profundidade local
$H_0$	profundidade da superfície livre de repouso (m) com fundo plano
$i = 1, 2, \dots, n - 1$	
$j = 1, 2, \dots;$	
$k$	coeficiente de atrito adimensional na coluna de água ( $2,5 \times 10^{-3}$ )
$K_H, K_z$ ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	coeficientes cinemáticos de difusão de sal longitudinal e vertical, respectivamente
$M_2, S_2, N_2$	principais componentes semidiurnos da maré
$n$	instante final da amostragem
$N$	número amostral
$N_H, N_z$	coeficientes cinemáticos de viscosidade ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) longitudinal e vertical, respectivamente
$O_1, K_1, Q_1$	principais componentes diurnos da maré
$Oxyz$	sistema de referência cartesiano ortogonal com Ox orientado na direção transversal, Oy na longitudinal e Oz na vertical (orientado positivamente no sentido da aceleração de gravidade) em relação ao canal
$\rho_0$	densidade de referência da água doce ( $1.000$ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
$\rho$	densidade da água ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
$\rho_{ar}$	densidade do ar ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )

---

$Q_f$	descarga de água doce ( $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ )
$S$	salinidade ( $\text{‰}$ )
$S_f$	valor estacionário de salinidade no fundo ( $\text{‰}$ )
$S_s$	valor estacionário de salinidade na superfície ( $\text{‰}$ )
$\bar{s}$	valor estacionário médio da salinidade na coluna de água ( $\text{‰}$ )
$\tau_{By}$	tensão de cisalhamento no fundo ( $\text{N}.\text{m}^{-2}$ )
$\tau_{Wy}$	tensão de cisalhamento do vento na superfície ( $\text{N}.\text{m}^{-2}$ )
$t$	instante de tempo da obtenção dos dados de campo
$U, V, W$	velocidades do vento ( $\text{m}.\text{s}^{-1}$ ) transversais, longitudinais e verticais ao canal de estuário, respectivamente
$u, v, w$	velocidades de corrente ( $\text{m}.\text{s}^{-1}$ ) transversais, longitudinais e verticais ao canal do estuário, respectivamente
$v(y, 0)$	velocidade longitudinal calculada na superfície livre ( $\text{m}.\text{s}^{-1}$ )
$v_0$	amplitude da velocidade gerada pela maré ( $\text{m}.\text{s}^{-1}$ )
$v_s$	valor da corrente residual na superfície ( $\text{m}.\text{s}^{-1}$ )
$v_f$	velocidade gerada pela descarga fluvial ( $\text{m}.\text{s}^{-1}$ )
$\nu$	número adimensional que determina o percentual relativo do fluxo difusivo/advectivo de sal
$x, y, z$	coordenadas transversais, longitudinais e verticais, respectivamente
$X_{obs}$	propriedades observadas (componente $v$ ou

---

	salinidade)
$X_{modelo}$	valores das propriedades (componente $v$ ou salinidade) calculados pelos modelos analíticos
$\bar{X}_{obs}$	médias em profundidade correspondentes a valores observados
$Z (Z = z/H_0)$	profundidade adimensional
$\psi = \psi(y, z)$	função corrente

# Resumo

A circulação estacionária gerada pelas forçantes passagem de frentes, descarga fluvial e gradiente longitudinal de densidade foi avaliada no estuário da Lagoa dos Patos considerando diferentes condições de descarga fluvial. Adaptações de ciclos de maré para “ciclos de enchente-vazante” foram feitas para que os modelos analíticos segundo MIRANDA *et al.* (2002; 2012) e FISHER *et al.* (1972) fossem utilizados em um estuário dirigido por ventos e descarga fluvial. A importância relativa das forçantes foi quantificada e os perfis estacionários de velocidade longitudinal e de salinidade foram simulados. Dados experimentais de descarga fluvial, salinidade e intensidade e direção dos ventos e de correntes foram utilizados para a verificação das simulações e descrições hidrográficas. Os resultados das simulações foram satisfatórios ( $\text{Skill} > 0,92$  e baixos valores de  $\text{RMAE}/\text{RMSE}$ ), demonstrando uma dominância da descarga fluvial e, em segundo plano, do gradiente longitudinal de densidade sobre o vento em condições de moderada à alta vazão. Em descargas fluviais baixas, a magnitude do vento nos perfis de velocidade torna-se comparável a das outras duas forçantes, mas apresentando valores desprezíveis nos perfis de salinidade. Os modelos utilizados podem estar subestimando o papel do vento na circulação estacionária por não considerarem seu efeito remoto além do local.

**PALAVRAS-CHAVE:** circulação estacionária, Lagoa dos Patos, modelos analíticos, estuários forçados por ventos e descarga fluvial

# Abstract

The steady-state circulation driven by the passage of frontal systems, river discharge, and longitudinal density gradient was assessed in the estuary of Patos Lagoon by considering different river discharge conditions. Adaptations from tidal cycles to “ebb-flood cycles” were made in order to apply the analytical models according to MIRANDA *et al.* (2002; 2012) and FISHER *et al.* (1972) on an estuary driven by the wind and river discharge. The relative importance of the three forcings was quantified and the steady-state vertical profiles of longitudinal current speed and salinity were simulated. Field data of river discharge, salinity, and intensity and direction of winds and currents were used to verify the theoretical simulations and in hydrographic descriptions. The simulation results were satisfactory (Skill > 0,92 and low values of RMAE/RMSE), demonstrating the dominance of the river discharge and, secondly, of the longitudinal density gradient over the wind in conditions of moderate to high discharges. During low river discharge, the magnitude of the wind on the mean current speed profiles becomes comparable to the other two forcings, but presenting negligible values on the mean salinity profiles. The models can be underestimating the wind role on the steady-state circulation by not considering its remote effect besides the local one.

**KEYWORDS:** steady-state circulation , Patos Lagoon, analytical models, wind- and river-driven estuaries

# Capítulo 1

## INTRODUÇÃO

1 Os estuários podem ser definidos segundo PRITCHARD (1955) e CAMERON  
2 & PRITCHARD (1963) como um “corpo de água costeiro semifechado, com ligação  
3 livre com o oceano aberto, no interior do qual a água do mar é mensuravelmente  
4 diluída pela água doce oriunda da drenagem continental.” Este conceito é am-  
5 plamente utilizado na literatura e principalmente em trabalhos que abordam a  
6 complexa oceanografia física destes ambientes costeiros. A importância socioe-  
7 conômica dos estuários é indiscutível por propiciar condições abrigadas para a  
8 instalação de portos e para o desenvolvimento de espécies eurihalinas essenciais a  
9 pesca e a sua manutenção. O conhecimento de sua hidrodinâmica torna-se crucial  
10 para determinar fatores como a navegabilidade, previsões de eventos extremos, su-  
11 cesso de atividades como pesca e agricultura, tomada de decisões que afetam direta-  
12 e indiretamente a população ribeirinha, entre outros.

13 Os fluxos através dos estuários são condicionados por uma série de forçantes,  
14 onde se destacam as marés, os ventos, a pressão atmosférica, a descarga fluvial e o  
15 campo de densidade, determinando complexos padrões de circulação que conferem  
16 aos estuários sua característica mais marcante: a variabilidade (NETO, 1996).  
17 Estes fluxos determinam trocas de propriedades que geralmente ocorrem em canais

18 estreitos de intensa dinâmica e em escalas temporais variadas (FERNANDES *et*  
19 *al.*, 2002), podendo ser transportadas para as áreas costeiras adjacentes compostas  
20 pela plataforma continental interna e externa. Para manter o bom funcionamento  
21 de portos, obras costeiras como molhes e quebra-mares e operações de dragagem  
22 são periodicamente realizadas nos canais de acesso dos estuários, acarretando em  
23 modificações da hidrodinâmica local e na circulação estacionária.

24 Neste contexto, está inserido o principal corpo hídrico do estado do Rio Grande  
25 do Sul: a Lagoa dos Patos (**Fig. 1**). Ela é classificada como uma lagoa costeira  
26 do tipo estrangulada com regime de micromaré, e considerada como a maior lagoa  
27 costeira do mundo (KJERFVE, 1986), possuindo cerca de 240 km de comprimento  
28 e drenando águas de uma extensa bacia hidrográfica através de um estreito canal,  
29 comumente denominado Canal de Acesso do Porto do Rio Grande (CA). A profun-  
30 didade média da Lagoa é de 5 m, podendo chegar a 12 - 18 m neste canal devido  
31 à operações de dragagem realizadas no Porto de Rio Grande, um dos principais  
32 portos do País, sendo o quarto em movimentação de cargas (ANTAQ, 2010). A  
33 sua circulação é principalmente dirigida por ventos paralelos à costa e pela des-  
34 carga fluvial (MÖLLER *et al.*, 2001), com a maré astronômica apresentando pouca  
35 importância na determinação dos regimes de enchente e vazante (MÖLLER *et*  
36 *al.*, 1991; MÖLLER, 1996).

37 Ferramentas como modelos numéricos e analíticos, associadas a dados de campo  
38 para assegurar a sua efetividade, são amplamente utilizadas para estudar a hidro-  
39 dinâmica de estuários, podendo ser também utilizados para o estudo da sua cir-  
40 culação estacionária. Este tipo de circulação é caracterizada por ser submareal e  
41 paralela ao eixo principal do estuário, determinando o transporte e distribuição à  
42 longo prazo de salinidade e materiais como sedimentos, fitoplâncton, poluentes etc  
43 (STACEY *et al.*, 2001). As soluções analíticas, não obstante considerarem apenas  
44 condições estacionárias, são de simples uso e apresentam uma grande importância

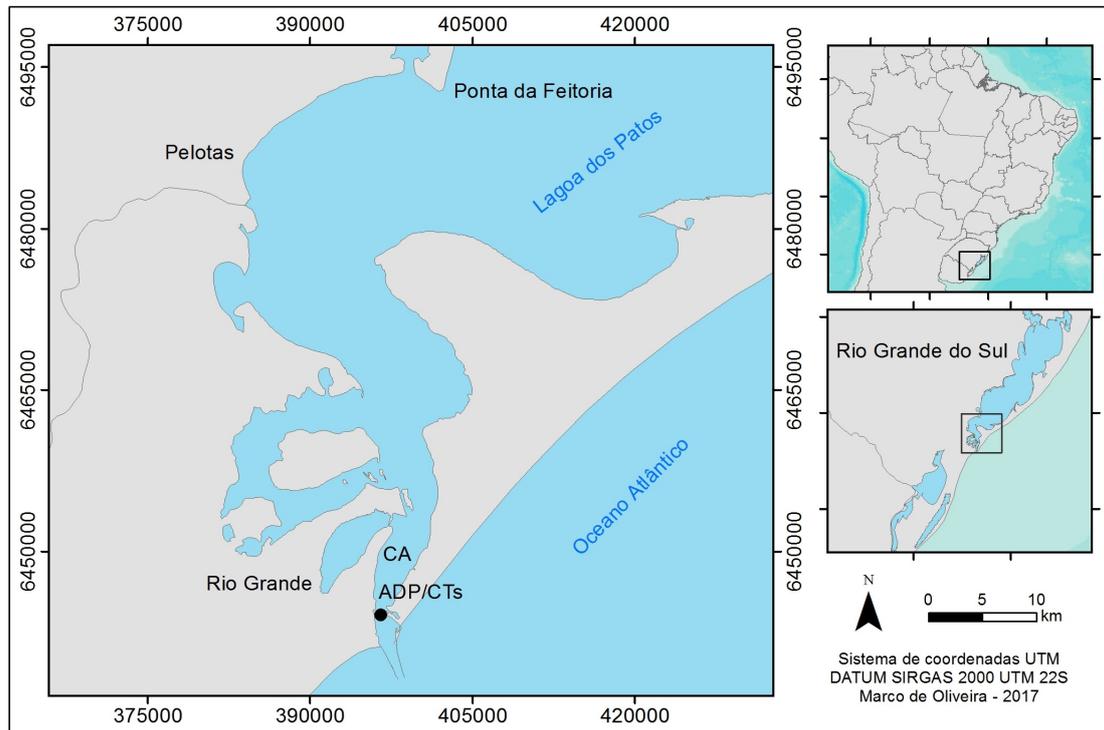


Figura 1: Mapa do estuário da Lagoa dos Patos, dando ênfase para o Canal de Acesso ao Porto do Rio Grande (CA) e para a localização do ponto de fundeio do ADP e dos CTs (ADP/CTs).

45 prática, além de fornecerem uma resposta rápida e permitirem a análise de movi-  
46 mentos residuais (MIRANDA *et al.*, 2002; 2012). Além disso, segundo BERNAR-  
47 DES (2001), podem deduzir analiticamente a distribuição vertical de velocidade, a  
48 inclinação da superfície livre e a variação longitudinal de salinidade geradas pelas  
49 forçantes descarga fluvial, gradiente de pressão, tensão de cisalhamento do vento  
50 e por processos de mistura.

51 Estudos com simulações hidrodinâmicas a exemplo de MÖLLER *et al.* (1996),  
52 CASTELÃO & MÖLLER (2003), FERNANDES *et al.* (2005) e MARQUES *et*  
53 *al.* (2014) utilizaram modelos numéricos para estudar a circulação e processos  
54 de mistura do estuário da Lagoa dos Patos. Entretanto, ainda não há trabalhos  
55 utilizando modelos analíticos para descrever estes processos e o papel de suas

56 forçantes neste estuário.

57       Relacionado ao estudo da hidrodinâmica de estuários através de modelos ana-  
58 líticos, pode-se citar os trabalhos de ARONS & STOMMEL (1951), FISHER *et al.*  
59 (1972), OFFICER (1976) e PRANDLE (1985). O trabalho pioneiro de ARONS  
60 & STOMMEL (*op. cit.*) expandiu o modelo de prisma de maré de KETCHUM  
61 (1951) para calcular analiticamente a distribuição longitudinal de salinidade de  
62 um estuário idealizado de tipo bem misturado, comparado-a com dados de campo.  
63 Apesar da concordância entre as curvas teóricas e experimentais da distribuição  
64 média de salinidade, o cálculo *a priori* do resultante “Número de Descarga” ( $F$ )  
65 não foi considerado viável. FISHER *et al.* (*op. cit.*) desenvolveram um modelo  
66 matemático para estuários parcialmente misturados que determina a distribuição  
67 longitudinal e vertical tanto de velocidade quanto de salinidade, possuindo como  
68 *input* a distância da intrusão salina, a salinidade da borda oceânica, a distribuição  
69 da salinidade promediada na vertical e a descarga de água doce proveniente do rio.  
70 O modelo foi validado através de dados de testes de laboratório e de dados de um  
71 estudo realizado no Rio James. O estudo clássico mais recente, PRANDLE (*op.*  
72 *cit.*), desenvolveu um modelo analítico para estuários estreitos tendo como a for-  
73 çante principal a maré, derivando os perfis verticais de velocidade separadamente  
74 através da (a) descarga do rio, (b) cisalhamento do vento, (c) gradiente longitudi-  
75 nal de densidade bem misturado e (d) cunha salina completamente estratificada.  
76 Por meio de parâmetros adimensionais que foram avaliados em nove importantes  
77 estuários (como os dos rios Columbia e James), foi possível indicar a magnitude  
78 de cada forçante na circulação estacionária.

79       No Brasil, MIRANDA & CASTRO (1996) utilizaram um modelo teórico uni-  
80 dimensional (OFFICER, 1977) para avaliar as principais forçantes da circulação  
81 estacionária submareal da região sul do Mar de Cananéia. Este estuário possui  
82 baixas profundidades e marés de sinal diurno, sendo classificado como tipo parci-

83 almente misturado com fraca estratificação vertical (tipo 2a). O perfil estacionário  
84 de velocidade é muito similar ao observado neste trabalho para o estuário da Lagoa  
85 dos Patos, apresentando predomínio de velocidades de vazante com fluxo fraco e  
86 reverso perto do fundo da coluna de água. Seu estudo indicou que os principais  
87 mecanismos geradores de movimento foram o gradiente longitudinal de salinidade  
88 e a descarga fluvial.

89 Este resultado está de acordo com BERNARDES (2001), que utilizou os mo-  
90 delos analíticos de HANSEN & RATTRAY (1966), FISHER *et al.* (1972), PRAN-  
91 DLE (1985) e MIRANDA *et al.* (1998) para descrever a circulação estacionária  
92 e a estratificação de salinidade do sistema estuarino de Cananéia e do Canal de  
93 Bertiooga. A maré no Mar de Cananéia é semidiurna com amplitudes médias de 1,2  
94 m e 0,25 m em regimes de sizígia e quadratura (MESQUITA & HARARI, 1983),  
95 respectivamente, e mista com predominância semidiurna no Canal de Bertiooga,  
96 apresentando amplitudes que variam de 0,73 m a 1,5 m (MIRANDA *et al.*, 1998).  
97 Os dados utilizados como entrada dos modelos foram amostrados em 41 estações  
98 fixas, em intervalos de tempo que abrangeram pelo menos um ciclo de maré semi-  
99 diurna (13 horas). Este autor observou uma influência secundária do vento pelos  
100 ajustes com os dados experimentais terem promovido melhores resultados sem o  
101 efeito da tensão de cisalhamento do vento.

102 MIRANDA *et al.* (2005) realizou um estudo da circulação estacionária no Rio  
103 Curimataú, Rio Grande do Norte (RN), classificado como tipo bem misturado e  
104 apresentando profundidades menores do que 10 m. Dois ciclos semidiurnos de  
105 maré foram amostrados durante os regimes de quadratura e de sizígia na estação  
106 de outono de 2001, período este marcado por fortes chuvas. O modelo analítico  
107 bidimensional segundo HANSEN & RATTRAY (1965) foi utilizado e assumiu-se  
108 uma tensão de cisalhamento do vento negligenciável. Os resultados das simulações  
109 do perfil longitudinal de velocidade foram classificados como razoáveis de acordo

110 com o índice RMAE (*Root Mean Absolut Error*) e os perfis teóricos de salinidade  
111 apresentaram baixas concordâncias com os dados de campo. As principais forçan-  
112 tes da circulação estacionária foram a descarga fluvial e a força do gradiente de  
113 pressão horizontal.

114 Um estudo similar foi realizado mais recentemente no Canal de Piaçaguera  
115 do estuário de Santos (MIRANDA *et al.*, 2012), classificado como tipo 2a e com  
116 maré mista semidiurna, apresentando regime de micromaré (amplitudes menores  
117 do que 2 m). Os dados experimentais foram adquiridos por meio de uma estação  
118 fixa situada em 11 m de profundidade durante a estação de inverno de 2001. Três  
119 ciclos semidiurnos completos foram considerados nas simulações teóricas com o  
120 modelo 2-D segundo HANSEN & RATTRAY (1965); entretanto, um total de 36  
121 ciclos semidiurnos foram amostrados durante este estudo. Uma abordagem similar  
122 ao presente trabalho foi feita em relação aos valores do gradiente longitudinal de  
123 densidade, ajustados conforme resultados das simulações teóricas, ressaltando que  
124 estes autores também realizaram ajustes na salinidade média da coluna de água.  
125 Tanto as simulações dos perfis de velocidade longitudinal como de salinidade apre-  
126 sentaram valores do parâmetro Skill (WARNER *et al.*, 2005) próximos de 1 (um),  
127 o que indica ajuste perfeito entre os dados e a teoria. A dinâmica estacionária do  
128 canal do estuário foi principalmente atribuída à descarga de água doce, gradiente  
129 de pressão baroclínico e a forças friccionais dissipativas.

130 Os estudos mencionados serviram de motivação para testar a aplicabilidade  
131 destes modelos analíticos em um estuário dirigido por ventos e decarga fluvial,  
132 como o da Lagoa dos Patos, a fim de verificar a sua circulação estacionária e o  
133 respectivo papel das forçantes tensão de cisalhamento do vento (em período de  
134 passagem de frentes), descarga fluvial e gradiente longitudinal de densidade.

## 135 1.1. Área de Estudo

136 A Lagoa dos Patos situa-se entre 30 e 32 °S de latitude no extremo sul do  
137 Brasil (**Fig. 1**), comunicando-se com o Oceano Atlântico na sua extremidade  
138 sul através do canal dos Molhes da Barra da cidade de Rio Grande (TOLDO  
139 *et al.*, 1991). Ela é considerada a maior lagoa costeira estrangulada do mundo  
140 (KJERFVE, 1986), com dimensões de 250 km de comprimento, 40 km de largura,  
141 profundidade média de 5 m e uma área superficial de 10.360 km<sup>2</sup> (MÖLLER *et*  
142 *al.*, 1996). As principais feições morfológicas são as células elípticas, separadas por  
143 esporões arenosos (*sand spits*). Com exceção das bordas e dos bancos arenosos que  
144 separam a porção lagunar da área estuarina e que marcam esta feição, de acordo  
145 com TOLDO (1994) o fundo da Lagoa dos Patos é constituído por sedimentos finos,  
146 como silte e argila. A área superficial da lagoa é dividida nas porções lagunar  
147 e estuarina, que representam cerca de 90 % e apenas 10 % de sua área total,  
148 respectivamente (DELANEY, 1965).

149 A classificação do estuário segundo o sistema de HANSEN & RATTRAY (1965)  
150 varia desde o tipo de cunha salina até bem misturado (MÖLLER & CASTAING,  
151 1999), com uma média anual de salinidade igual a 13 ‰ e apresentando valores  
152 instantâneos que variam de 0 a 34 ‰ (CASTELLO, 1985). A intensidade do  
153 gradiente vertical de salinidade depende da intensidade relativa da descarga do rio  
154 e da ação do vento, mas pode ser considerada praticamente nula até 40 km da  
155 Praticagem da Barra de Rio Grande (MÖLLER & CASTAING, 1999).

156 Os rios tributários da Lagoa dos Patos apresentam descarga fluvial alta no final  
157 do inverno e início da primavera, seguida de uma baixa a moderada intensidade  
158 durante as estações de verão e outono (VAZ *et al.*, 2006). A vazão média anual da  
159 lagoa é de 2.400 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, mas pode atingir picos que vão de 8.000 a 12.000 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>  
160 em anos de El Niño (MÖLLER *et al.*, 1996). Durante esses anos, a lagoa pode

161 permanecer doce por vários meses (PAIM & MÖLLER, 1986). O limite da zona  
162 estuarina está situado no entorno da região da Ponta da Feitoria, localizada a 70 km  
163 da boca do estuário (**Fig. 1**), podendo estender-se até a porção intermediária desta  
164 laguna (distância de  $\sim 200$  km) em períodos prolongados de estiagem, causados por  
165 ventos predominantes do quadrante Sul (HARTMANN e SCHETTINI, 1991).

166 A circulação da Lagoa dos Patos é principalmente dirigida por ventos de NE/SO  
167 e pela descarga fluvial, sendo o vento a principal forçante em períodos de baixa a  
168 moderada vazão ( $< 3.000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) e em escalas temporais associadas a passagem  
169 de frentes meteorológicas, que variam de 3 a 17 dias (MÖLLER *et al.*, 2001).  
170 Em descargas fluviais maiores do que  $4.000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , a influência dos ventos do  
171 quadrante Sul é sobreposta pela vazão, inclusive impedindo a entrada de águas  
172 costeiras (MÖLLER & CASTAING, 1999).

173 Os sistemas atmosféricos de maior frequência na região são os anticiclones  
174 migratórios de origem polar, que induzem uma mudança na direção dos ventos  
175 de SO para NE, afetando diretamente a região estuarina por meio dos regimes de  
176 enchente e vazante. A passagem de sistemas frontais sobre a lagoa é mais frequente  
177 durante a estação de inverno, com uma média de período de 6 dias, enquanto que  
178 no verão a ocorrência desses eventos é mais esparsa, apresentando uma média de  
179 11 dias (MÖLLER *et al.*, 1996). Ventos de nordeste são predominantes ao longo de  
180 todo ano e estão associados ao centro de alta pressão gerado pelo anticiclone semi-  
181 estacionário do Atlântico Sul, que é mais intenso entre as estações de primavera e  
182 verão e mais fraco durante o inverno (MÖLLER *et al.*, 2008). Os ventos de oeste  
183 e sudoeste passam a ganhar importância durante as estações de outono e inverno  
184 (TOMAZELLI, 1993).

185 A dinâmica da lagoa é influenciada pelos efeitos remoto e local do vento, assim  
186 como por uma combinação dos dois. O efeito local ocorre através da transferência  
187 direta de momento pela tensão de cisalhamento superficial sobre o corpo hídrico,

gerando correntes, oscilações de curto período ( $\sim 24$  h) e desníveis entre suas extremidades (MÖLLER, 1996). O efeito remoto ocorre pelo Transporte de Ekman na costa adjacente, onde ventos paralelos à costa com direções de NE e SO causam descidas e subidas de nível nesta região, respectivamente, tendo como consequência fluxos de vazante e enchente no estuário, respectivamente. A combinação dos dois efeitos do vento provocam desníveis entre a região interna da lagoa e a zona costeira, como mostrado na **Figura 2** adaptada de MÖLLER *et al.*, 2001. Pela orientação do eixo da Lagoa dos Patos ser na direção NE-SO, o efeito local do vento de NE (**Fig. 2a**) tende a causar rebaixamento no nível do interior da lagoa e empilhamento na região estuarina, ao mesmo tempo que o efeito remoto diminui o nível na costa, favorecendo fluxos de vazante no estuário. Quando as condições são de ventos de SO (**Fig. 2b**), ocorre um empilhamento de água no interior da lagoa e abaixamento de nível na zona estuarina, enquanto que o efeito remoto tende a elevar o nível na costa adjacente, favorecendo fluxos de enchente no estuário. Vale ressaltar que o resultado final desta combinação dos efeitos remoto e local do vento também é influenciado pelo volume de água proveniente da descarga fluvial (FERNANDES *et al.*, 2004).

O estuário da Lagoa dos Patos possui um regime de micromaré, com influência restrita à região estuarina pelo fato do Canal de Acesso agir como um filtro dinâmico que atenua as amplitudes de seus constituintes (MÖLLER, 1996; FERNANDES, 2001; FERNANDES *et al.*, 2004). A maré é classificada como mista, havendo uma predominância do sinal diurno (MARTINS *et al.*, 2007), apresentando uma amplitude média de apenas 0,3 m (MÖLLER *et al.*, 2007). A hidrodinâmica da zona estuarina é bem mais diversa do que no restante da lagoa, atingindo velocidades de  $2,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  no Canal de Acesso (GAFRÉE, 1927) devido ao estreitamento exponencial da área da seção transversal do estuário. Este canal estreito ( $< 1$  km de largura na boca) é a única comunicação da Lagoa dos Patos com

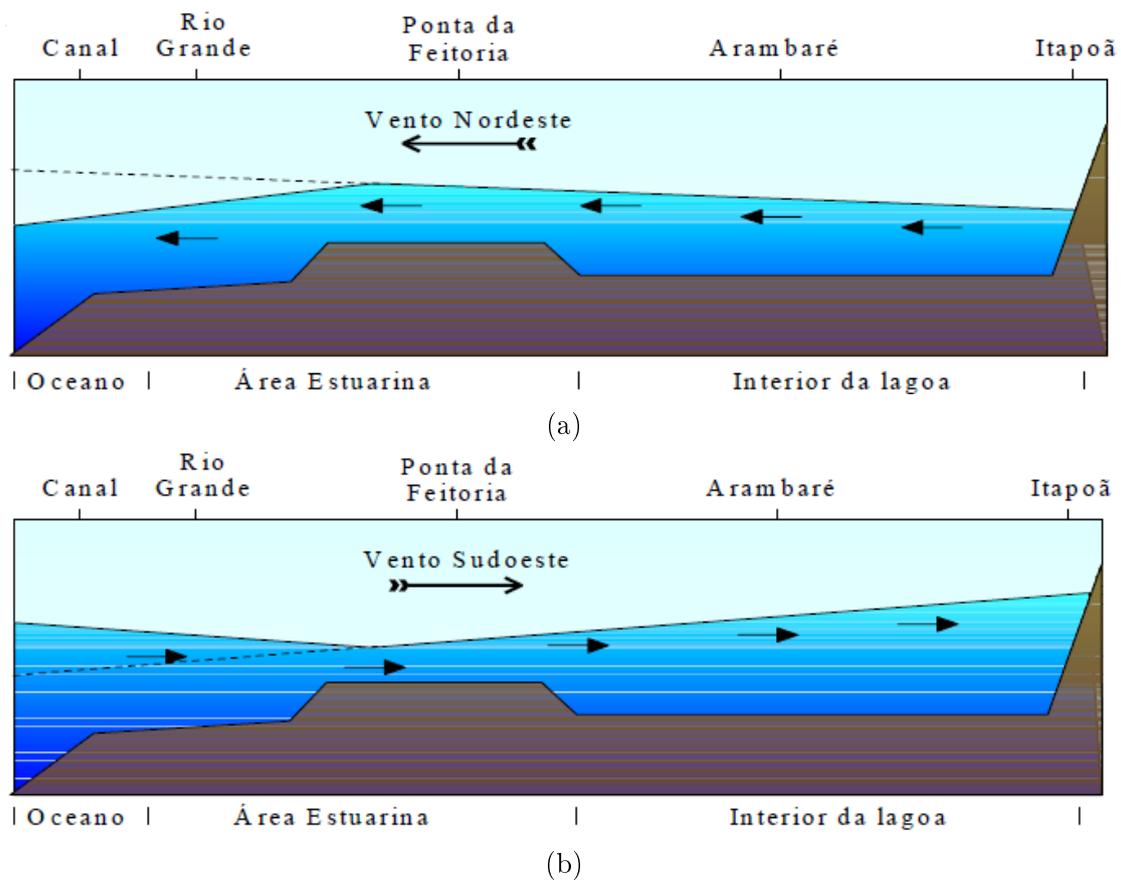


Figura 2: Esquema de oscilação de nível longitudinal à Lagoa dos Patos em condições de (a) ventos de NE e (b) ventos de SO. Adaptado de MÖLLER *et al.* (2001).

215 o Oceano Atlântico Sul para drenar uma bacia hidrográfica de aproximadamente  
 216 200.000 km<sup>2</sup> (MÖLLER & CASTAING, 1999), ocorrendo trocas com o oceano em  
 217 variadas escalas temporais (FERNANDES *et al.*, 2002). Apesar da profundidade  
 218 média da lagoa ser de apenas 5 m, os canais dragados próximos ao Porto de Rio  
 219 Grande sofrem um aprofundamento progressivo de 12 para 18 m de profundidade  
 220 em direção ao oceano (FERNANDES *et al.*, 2005).

221 A costa adjacente à região de estudo é influenciada pela Pluma do Rio da Prata,  
 222 que se desenvolve entre as latitudes de 28°S durante o inverno e de 32°S durante o  
 223 verão (MÖLLER *et al.*, 2008), apresentando baixas salinidades < 33.5 (PIOLA *et*

224 *al.*, 2000). Distante da boca, ventos paralelos à costa parecem ser o mais relevante  
225 mecanismo para o deslocamento meridional da pluma (MÖLLER *et al.*, op. cit).  
226 Segundo PIOLA *et al.* (2005) e MÖLLER *et al.* (op. cit), ventos de S/SO,  
227 predominantes no inverno, forçam a pluma para norte mesmo durante períodos  
228 de baixa descarga fluvial, mantendo-a restrita à costa e relativamente estreita (60  
229 km), além de produzir um intenso gradiente de salinidade perpendicular à costa;  
230 ventos de NE retém a pluma ao sul e a espalham sobre toda plataforma continental,  
231 deixando o restante da plataforma sob influência das massas de água Tropical (AT),  
232 Subtropical de Plataforma (ASTP) e Central do Atlântico Sul (ACAS).

## 233 Capítulo 2

### 234 OBJETIVOS

235 O objetivo geral deste estudo é descrever analiticamente a circulação estaci-  
236 onária forçada pela passagem de sistemas frontais, pela descarga fluvial e pelo  
237 gradiente longitudinal de densidade no Canal de Acesso ao estuário da Lagoa dos  
238 Patos, considerando diferentes condições de descarga fluvial.

#### 239 2.1. Objetivos Específicos

240 Dentre os objetivos específicos deste trabalho, pode-se destacar:

- 241 • Simular os perfis verticais estacionários de salinidade e do componente lon-  
242 gitudinal de velocidade,  $v$ , a partir de modelos analíticos bidimensionais,  
243 buscando estimar os coeficientes de viscosidade turbulenta e de difusão tur-  
244 bulenta;
- 245 • Quantificar a magnitude das forçantes consideradas neste trabalho na circu-  
246 lação estacionária estuarina;
- 247 • Caracterizar a variabilidade dos fluxos e da salinidade no Canal de Acesso  
248 em função dos fatores forçantes.

## 249 Capítulo 3

# 250 MATERIAL E MÉTODOS

### 251 3.1. Dados de Campo

252 O período de estudo foi escolhido conforme a disponibilidade de dados de campo  
253 de velocidade de corrente, que foi de 17 de agosto de 2005 a 31 de dezembro de  
254 2011, tendo uma interrupção de oito meses ocasionada por operações de dragagem  
255 no canal (de agosto/2009 a abril/2010). Este período também abrangeu a obra de  
256 ampliação dos Molhes da Barra de Rio Grande, que foi concluída em 28 de fevereiro  
257 de 2011, não interrompendo as medições.

258 Para eliminar periodicidades, foram calculados os valores médios de veloci-  
259 dade ao longo de ciclos de enchente-vazante (descritos na seção 3.2) para então se  
260 obter um comportamento quase-estacionário, pré-requisito para o uso dos mode-  
261 los analíticos. Para tanto, foi utilizada a fórmula para o cálculo do perfil médio  
262 espaço-temporal do componente longitudinal ao canal ( $v$ ) segundo MIRANDA *et*  
263 *al.* (2002; 2012):

$$\langle v(Z_j) \rangle = \frac{1}{n} \left[ \frac{v(Z_j, t_0)}{2} + \sum_i v(Z_j, t_i) + \frac{v(Z_j, t_n)}{2} \right], \quad (3.1)$$

264 onde:

265  $\langle \rangle$ : média temporal;

266  $Z$ : profundidade adimensional, no formato  $Z = \frac{z}{|h(x,y,t)|}$ , onde  $z$  = profundidade  
267 amostral e  $h$  = profundidade média local;

268  $j = 1, 2, \dots$ ;

269  $n$  = instante final da amostragem;

270  $t$ : instante de tempo da obtenção dos dados de campo;

271  $i = 1, 2, \dots, n - 1$

272 O cálculo do perfil médio de salinidade seguiu a mesma metodologia matemá-  
273 tica aplicada ao componente  $v$ .

274 Para se ter conhecimento sobre a variabilidade dos perfis verticais médios, foram  
275 também calculados os desvios padrão com um nível de significância de 95 %. As  
276 análises hidrográficas aplicadas aos dados de campo consistem em médias anuais e  
277 mensais, desvios padrão, distribuições de frequência e oscilações (desvios) mensais  
278 no entorno das médias.

### 279 3.1.1. Velocidade e Direção de Correntes

280 Os dados de velocidade e direção de corrente utilizados neste trabalho entre os  
281 anos de 2005 a 2009 provieram do perfilador acústico de correntes *ADP* (*Acoustic*  
282 *Doppler Profiler*) da marca *Sontek* e com frequência de 1 MHz. Este aparelho  
283 estava fundeado (32,14°S; 52,10°W) próximo ao centro do Canal de Acesso ao Porto  
284 de Rio Grande (**Fig. 1**) a uma profundidade de  $\sim 13$  m, região em que o canal  
285 orienta-se na direção N-S. Os perfis verticais adquiridos pelo ADP eram horários  
286 e divididos em 30 células de 0,6 m cada, com suas medições iniciando a 1,30 m  
287 do fundo. Após a operação de dragagem, os dados entre 2010 e 2011 passaram  
288 a ser adquiridos por um *Argonaut-XR* de mesma marca com frequência de 1,5  
289 MHz, mantendo a sua posição em  $\sim 13$  m de profundidade. Os perfis verticais

290 também eram horários, porém divididos em 10 células de 1,5 m cada, com suas  
 291 medições iniciando a 2,2 m do fundo. Para fins de comparação, os dados de  
 292 velocidade de corrente foram todos padronizados conforme o formato estabelecido  
 293 para o *Argonaut-XR*, ou seja, 10 células de 1,5 m cada e medições a partir de 2,2  
 294 m do fundo. Desta forma, a abrangência vertical das medições de velocidade foi  
 295 aproximadamente de 2,3 a 12,8 m de profundidade.

296 Todos os dados amostrados foram submetidos a um controle de qualidade e  
 297 foram interpolados para suprir pequenas falhas temporais. Devido à orientação  
 298 do canal ser aproximadamente N-S, as direções de corrente não necessitaram ro-  
 299 tação para se adequar ao sistema de coordenadas, sendo apenas decompostas nos  
 300 componentes  $v$  e  $u$  com sentido positivo em direção ao norte e para leste, res-  
 301 pectivamente, de acordo com o sistema referencial  $Ox,y,z$  (**Fig. 3**). Somente o  
 302 componente  $v$  foi considerado neste trabalho, sendo que correntes de enchente e  
 303 vazante são indicadas por  $v > 0$  e  $v < 0$ , respectivamente.

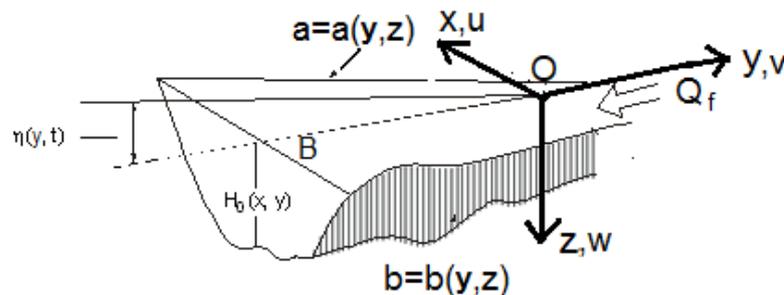


Figura 3: Sistema de coordenadas  $Ox,y,z$ , onde o eixo  $Ox$  é transversal ao canal do estuário e positivo para leste, correspondente ao componente  $u$  de velocidade; o eixo  $Oy$  é longitudinal ao canal e positivo para o norte, correspondente ao componente  $v$  de velocidade (enchente,  $v > 0$  e vazante,  $v < 0$ ); e o eixo  $Oz$  é vertical ao canal e orientado positivamente no sentido da aceleração da gravidade, correspondente ao componente  $w$  de velocidade e  $a = a(y, z)$  e  $b = b(y, z)$  denotam as margens leste e oeste, respectivamente;  $H_0$  é a profundidade da superfície livre de repouso com fundo plano e  $\eta = \eta(y, z)$  é a inclinação da superfície livre. Adaptado de MIRANDA *et al.* (2002; 2012).

304 Para separar o sinal de correntes de maré dos demais, foi utilizado um filtro de

305 32 horas de baixa frequência (“passa-baixa”), visto que o período da principal com-  
 306 ponente da maré no estuário da Lagoa dos Patos ( $O_1$ ) é de 25,82 h (FERNANDES  
 307 *et al.*, 2005; MÖLLER *et al.*, 2007). Uma análise espectral dos dados originais e  
 308 filtrados foi efetuada para garantir a eliminação completa do sinal de maré (**Fig.**  
 309 **4**).

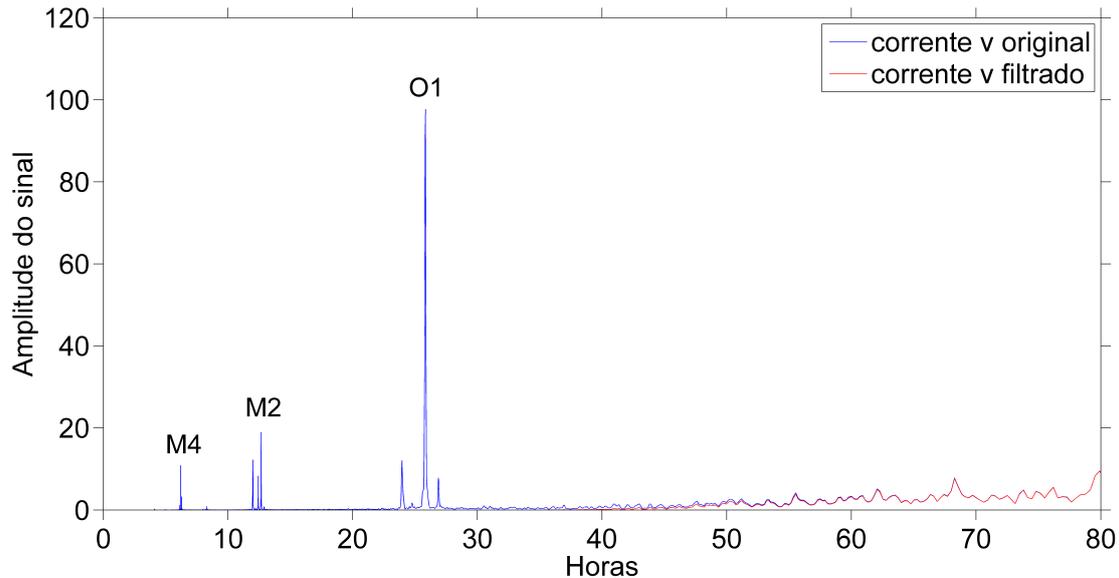


Figura 4: Análise espectral dos dados originais (azul) e filtrados (vermelho) de velocidade de corrente, indicando o período das principais componentes harmônicas da maré do estuário ( $M_4 = \sim 6,2$  h;  $M_2 = \sim 12,6$  h;  $O_1 = \sim 25,8$  h).

### 310 3.1.2. Velocidade e Direção do Vento

311 Os dados de velocidade e direção do vento provêm da estação meteorológica  
 312 localizada na Estação de Praticagem da Barra do Rio Grande ( $32^{\circ}08' S$ ;  $52^{\circ}06' W$ ;  
 313  $28$  m de altura). A distância entre a estação e o fundeio dos perfiladores acústicos é  
 314 de cerca de  $200$  m. Os dados abrangem o mesmo período dos dados oceanográficos  
 315 e foram rotacionados em  $37^{\circ}$  para leste em relação ao norte geográfico, de forma  
 316 que o componente longitudinal do vento se tornasse paralelo à linha de costa para

317 fins de determinação dos ciclos de enchente-vazante. Valores positivos e negativos  
318 indicam ventos de SO e de NE, respectivamente.

319 Para servir de forçante dos modelos, os dados de vento foram mantidos na sua  
320 orientação original (norte geográfico) com o objetivo de permanecerem aproxima-  
321 damente paralelos ao canal do estuário, apenas sendo decompostos em componen-  
322 tes longitudinais ( $V$ ) e transversais ( $U$ ). Somente a componente longitudinal  $V$   
323 foi inserida nos modelos, com valores positivos e negativos indicando direções de  
324 vento N e S, respectivamente. Tanto o vento paralelo à costa, quanto o vento longi-  
325 tudinal ao canal, foram processados com um filtro de baixa frequência de 29 horas  
326 com o objetivo de eliminar o efeito da brisa marítima. Uma análise espectral dos  
327 dados originais e filtrados foi efetuada para a verificação da eliminação completa  
328 do sinal da brisa marítima (**Fig. 5**).

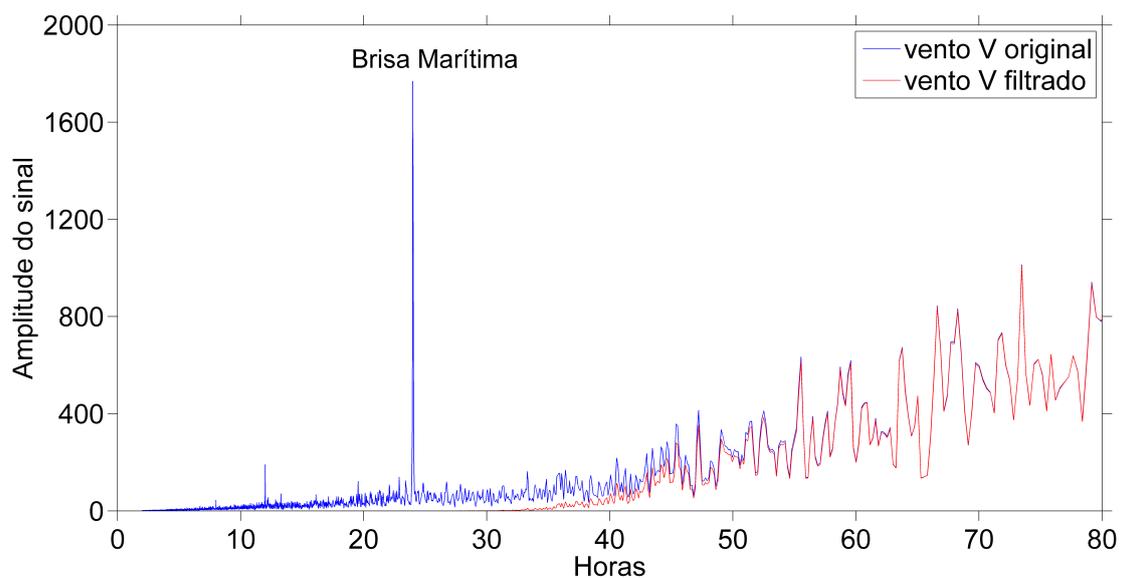


Figura 5: Análise espectral dos dados originais (azul) e filtrados (vermelho) de velocidade do vento paralelo ao canal ( $V$ ), indicando o período da brisa marítima ( $\sim 24$  h).

### 3.1.3. Salinidade

Os dados de salinidade foram obtidos através de dois termo-condutivímetros *SBE 37 SM* (CTs), localizados em um cabo poitado no píer da Estação Naval de Rio Grande (**Fig. 1**, “CTs”), apresentando uma distância de não mais do que 300 m do fundeio dos perfiladores acústicos. Os CTs foram instalados um próximo da superfície, em 3 m de profundidade, e outro próximo ao fundo, na profundidade de 14 m. A coleta dos dados de salinidade foi horária e o período abrangido é o mesmo dos demais. Os dados foram processados para a eliminação de “ruídos” e interpolados linearmente para cobrir pequenas falhas temporais. Quando ocorreram longos períodos sem medições devido a falhas técnicas, os correspondentes dados foram desconsiderados neste trabalho devido à impossibilidade de interpolação. Estas longas falhas estão apresentadas na **Tabela 1**.

Tabela 1: Falhas temporais nos dados de salinidade durante o período de estudo (17 de agosto de 2005 a 31 de dezembro de 2011) na superfície e no fundo da coluna de água.

Anos	Falhas temporais
2006	Superfície: de 17 de fevereiro a 20 de abril Fundo: de 14 de junho a 18 de julho
2007	Fundo: de 1 a 28 de janeiro
2009	Fundo: de 26 de março a 6 de agosto
2011	Fundo: de 25 de abril a 1 de maio

Para retirar o efeito da maré dos dados de salinidade, e com o intuito de manter a sua forma original, o mesmo filtro “passa-baixa” foi aplicado, porém com período de corte menor (24 horas). Desta forma, devido ao forte sinal do componente

344 harmônico  $O_1$  (**Fig. 6**), não foi possível remover completamente este sinal sem  
345 manter a forma original dos dados de salinidade. Para verificar se a forma dos  
346 dados originais foi preservada após a aplicação do filtro, uma série temporal de  
347 salinidade na superfície e no fundo de um ciclo de enchente-vazante foi utilizada  
348 como exemplo (**Fig. 7**).

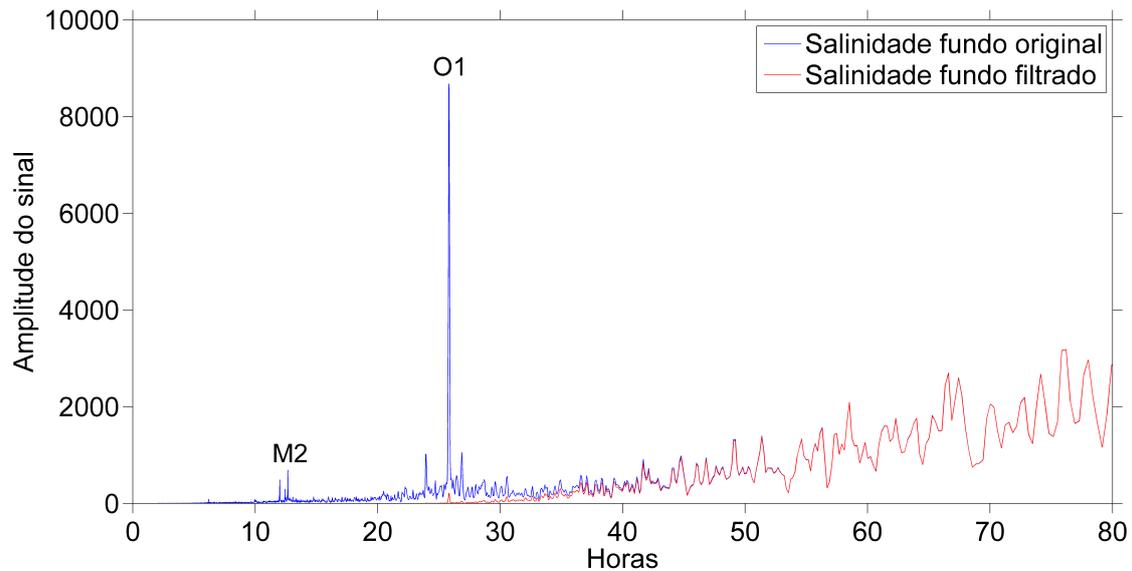


Figura 6: Análise espectral dos dados originais (azul) e filtrados (vermelho) de salinidade no fundo, indicando o período dos componentes harmônicas da maré  $M_2 = \sim 12,6$  h e  $O_1 = \sim 25,8$  h. O sinal do componente  $M_4$  foi praticamente nulo.

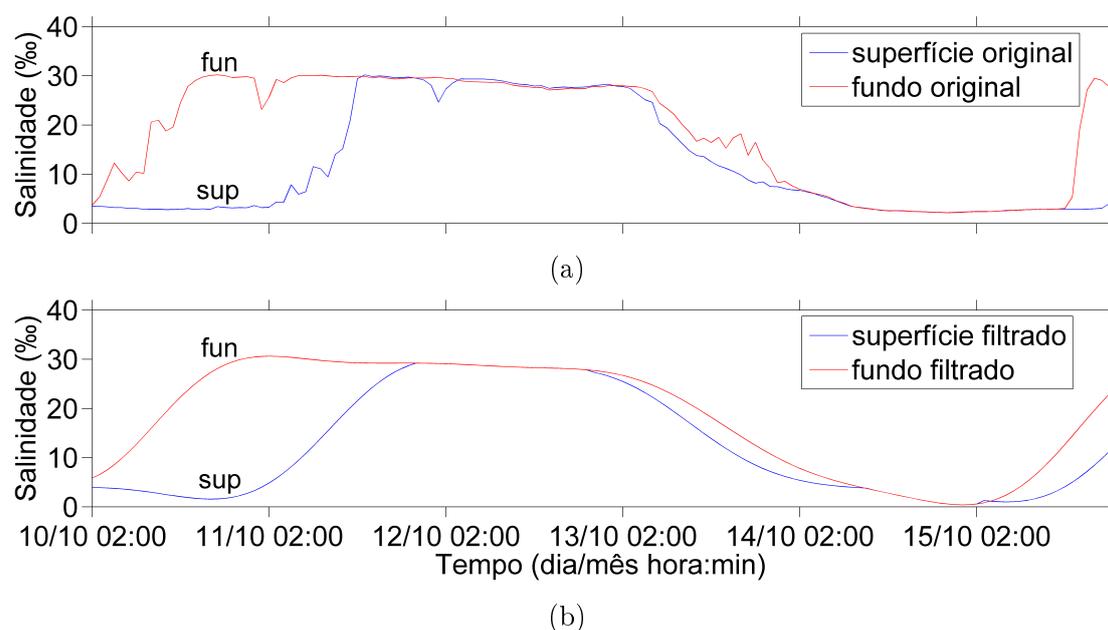


Figura 7: Série temporal dos dados (a) originais e (b) filtrados de salinidade na superfície (azul) e no fundo (vermelho) de um ciclo de enchente-vazante do ano de 2006.

349 Devido ao fato de que o gradiente longitudinal de densidade (salinidade) pode  
 350 ser considerado nulo no Canal de Acesso e só passa a ser importante a 40 km  
 351 estuário adentro na maior parte do ano (MÖLLER & CASTAING, 1999), valores  
 352 próximos a zero foram atribuídos para esta variável como dados de entrada nos  
 353 modelos.

#### 354 3.1.4. Descarga Fluvial

355 Os valores diários de descarga fluvial foram obtidos através da Agência Naci-  
 356 onal de Águas (ANA – <http://hidroweb.ana.gov.br/HidroWeb/>) a partir de três  
 357 importantes afluentes da Lagoa dos Patos: os rios Jacuí (Estação Rio Pardo), Ta-  
 358 quarí (Estação Encantado) e Camaquã (Estação Passo do Mendonça). As vazões  
 359 destes rios foram somadas e interpoladas segundo a metodologia empregada por  
 360 VAZ *et al.* (2006). O ano de 2011 apresentou uma falha de 31 dias que cobriu todo

o mês de março, não sendo interpolada devido a seu longo intervalo de tempo. As condições de alta e baixa descarga foram escolhidas no período de final de inverno/primavera e correspondente à estação de verão/outono, respectivamente. Como a vazão média anual da lagoa é de  $2.400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (MÖLLER *et al.*, 1996), valores próximos a esta vazão foram classificados como descarga fluvial média e valores abaixo e acima foram considerados como descarga fluvial baixa e alta, respectivamente. Devido à distância entre o Canal de Acesso e as três estações de medição que se encontram ao norte, a descarga fluvial de 20 dias antes do período dos ciclos de enchente-vazante foi considerada neste trabalho.

## 3.2. Ciclos de Enchente-Vazante

Visto que a circulação da Lagoa dos Patos é forçada principalmente por ventos de NE/SO e pela descarga fluvial (MÖLLER *et al.*, 2001), e como foram consideradas diferentes condições de vazão neste estudo, o principal critério para a seleção de ciclos de enchente-vazante foi a passagem de sistemas frontais. Uma frente será caracterizada neste trabalho pela sequência de ventos de SO (valores positivos) e ventos de NE (valores negativos), com início e fim demarcados por velocidades nulas. Procurou-se escolher os sistemas frontais mais intensos, com os picos de vento de NE/SO possuindo no mínimo  $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  de velocidade.

Em um ciclo de enchente-vazante determinado por sistemas frontais, a sequência de ventos de SO e de NE irá corresponder aos regimes de enchente e vazante, respectivamente, com início e fim demarcados por velocidade nula no fundo e na superfície, respectivamente. Desta forma, o regime de enchente inicia-se na marcação de zero de velocidade no fundo, enquanto que o regime de vazante termina no zero de velocidade na superfície. O fim e início dos regimes de enchente e vazante são marcados pelo zero de velocidade no meio do ciclo, respectivamente.

386 Devido ao longo período de estudo (7 anos), apenas um ciclo de enchente-  
 387 vazante por ano será descrito neste trabalho, sendo que a escolha dos mesmos  
 388 baseou-se na intensidade da descarga fluvial média de cada ano. Assim sendo,  
 389 se a descarga fluvial média de um ano foi classificada como baixa, moderada ou  
 390 alta, o ciclo de enchente-vazante escolhido para este ano terá uma intensidade de  
 391 descarga fluvial correspondente, como mostrado na **Tabela 2**. Apesar do ano de  
 392 2010 ter apresentado uma descarga fluvial moderada, apenas se observaram ciclos  
 393 de enchente-vazante com descarga fluvial baixa ou alta para este ano. Desta forma,  
 394 como a intensidade da descarga fluvial média do ano de 2010 é próxima a 2.000  
 395  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , o ciclo de descarga fluvial alta foi o escolhido para este ano.

Tabela 2: Classificação dos anos de estudo quanto à sua respectiva descarga fluvial média nas intensidades “BAIXA”, “MÉDIA” e “ALTA”.

Classificação quanto à descarga fluvial	Anos	Descarga fluvial média anual ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )
BAIXA	2006	800
	2009	740
MÉDIA	2007	1.789
	2008	1.444
	2011	1.422
ALTA	2005	2.393
	*2010	1.770

\* : O ano de 2010 apresentou uma descarga fluvial média, mas se enquadrou na classificação de descarga fluvial alta devido à ausência de ciclos de enchente-vazante com intensidade moderada de descarga fluvial.

### 3.2.1. Classificação segundo o Diagrama Estratificação-circulação de HANSEN & RATTRAY (1966)

Dentre os trabalhos desenvolvidos baseando-se na classificação de estuários através de parâmetros adimensionais (IPPEN & HARLEMAN, 1961; HARLEMAN & ABRAHAM, 1966; FISCHER, 1972; PRANDLE, 1985; SCOTT, 1993), destaca-se o Diagrama Estratificação-Circulação deduzido por HANSEN & RATTRAY (1966), amplamente considerado como o melhor método de classificação de estuários. Este diagrama assume condições estacionárias e estuários estreitos e seus eixos coordenados são compostos por dois parâmetros adimensionais (MIRANDA *et al.*, 2002; 2012):

- i Parâmetro estratificação ( $\delta S/\bar{s}$ ): representa uma medida da estratificação vertical da coluna de água, onde  $\delta S = S_f - S_s$  é a diferença entre os valores estacionários das salinidades no fundo ( $S_f$ ) e na superfície ( $S_s$ ).  $\bar{s}$  é o valor estacionário médio da salinidade na coluna d'água.
- ii Parâmetro circulação ( $v_s/v_f$ ): representa uma medida da circulação gravitacional, onde  $v_s$  é o valor da corrente residual na superfície e  $v_f$  é a velocidade gerada pela descarga fluvial.

Estes parâmetros estão relacionados através de um terceiro número adimensional denominado por  $\nu$ , que corresponde à fração do fluxo de sal na direção estuário acima e é representado pelas curvas paramétricas no diagrama. Seus valores variam de zero à um ( $0 < \nu \leq 1$ ), sendo que quanto mais próximo de zero e de um,  $\nu$  indica a predominância do processo de advecção e de difusão, respectivamente, no transporte de sal. Outro uso do Diagrama de Estratificação-circulação é a classificação quantitativa de estuários em MIRANDA *et al.* (2002; 2012):

**Tipo 1** – Equivalente a um estuário bem misturado, onde o fluxo resultante é

421 estuário abaixo em toda coluna de água e ocorre predomínio do processo de  
422 difusão turbulenta sobre o transporte de sal.

423 **Tipo 2 (a,b)** – Equivalente a um estuário parcialmente misturado, onde o fluxo  
424 resultante é bidirecional e ambos processos de advecção e difusão são im-  
425 portantes para o transporte de sal. Este tipo pode ser dividido em 2a e 2b  
426 dependendo se a estratificação vertical de salinidade é fraca ou bem marcada,  
427 respectivamente.

428 **Tipo 3 (a,b)** – Equivalente a um estuário tipo fiorde, representando grandes va-  
429 riações de velocidade de fluxo e domínio do processo advectivo no transporte  
430 de sal estuário acima.

431 **Tipo 4** – Equivalente a um estuário tipo cunha salina, onde a estratificação verti-  
432 cal de salinidade é máxima e o transporte de sal é quase que exclusivamente  
433 ocasionado por advecção.

434 Os ciclos de enchente-vazante deste estudo serão classificados através de uma  
435 combinação de três métodos: Diagrama Estratificação-circulação; valor de  $\delta S$  de  
436 acordo com a classificação de PRITCHARD (1989), onde valores de  $\delta S$  menores do  
437 que 5 unidades de sal e pelo menos 5 unidades de sal representam um estuário bem  
438 misturado e parcialmente misturado, respectivamente; e através do perfil médio  
439 de velocidade do componente  $v$ . Esta medida é necessária devido ao fato de que  
440 o Diagrama Estratificação-Circulação nem sempre é aplicável a todos os tipos de  
441 estuário, especialmente em estuários não-clássicos como o da Lagoa dos Patos, em  
442 que os fluxos de enchente e vazante são controlados pelas ações local e remota do  
443 vento e pela descarga fluvial.

### 3.3. Modelos Analíticos

Os modelos analíticos bidimensionais segundo FISHER *et al.* (1972) e MIRANDA *et al.* (2002; 2012), desenvolvidos para estuários do tipo parcialmente misturado e bem misturado, respectivamente, foram utilizados para calcular a importância relativa das forçantes que controlam a circulação estacionária e os processos de mistura no estuário da Lagoa dos Patos: passagem de frentes, descarga fluvial e o gradiente longitudinal de densidade. Além disso, estes modelos foram aplicados para a reprodução dos perfis verticais quasi-estacionários do componente  $v$  e de salinidade para o ponto de localização do fundeio dos perfiladores acústicos.

Segundo MIRANDA *et al.* (op. cit.), os modelos analíticos utilizados neste trabalho apresentam as seguintes premissas, sendo importante ressaltar que o Canal de Acesso à Lagoa dos Patos somente não respeita por completo a premissa de total estacionariedade:

- i Canais relativamente estreitos, assumindo o princípio de homogeneidade lateral;
- ii Seções longitudinal e transversal com geometria simples, onde a largura  $B$  do estuário varia gradativamente em função do eixo longitudinal,  $B = B(y)$ , mas seu valor numérico será mantido constante nos cálculos numéricos. Efeitos topográficos e gradientes laterais de salinidade (densidade) e da inclinação da superfície livre podem ser considerados desprezíveis;
- iii Ventos com pequena influência para a geração de ondas de gravidade;
- iv Aceleração de Coriolis desprezível;
- v Estratificação vertical de salinidade de ausente a moderada, já que estes

468 modelos são preferencialmente aplicados a estuários do tipo bem misturados  
469 ou parcialmente misturados com fraca estratificação vertical;

470 vi Condições estacionárias, ou seja, variações locais de propriedades iguais à  
471 zero ( $d/dt = 0$ ), obtidas através de médias das variáveis dependentes (como  
472 salinidade e velocidade) ao longo de pelo menos um ciclo completo de maré.

473 Seguindo a classificação quantitativa de estuários segundo PRITCHARD (1989),  
474 o modelo de MIRANDA *et al.* (2002; 2012) foi aplicado quando a diferença de sa-  
475 linidade entre a superfície e o fundo foi menor do que 5 ‰ (típico de estuários do  
476 tipo bem misturado); o modelo de FISHER *et al.* (1972) foi utilizado quando esta  
477 diferença de salinidade foi de pelo menos 5 ‰ (estuários parcialmente misturados).

### 478 3.3.1. Determinação da Qualidade das Simulações

479 De forma a avaliar quantitativamente a concordância entre os perfis simulados  
480 e os experimentais, o parâmetro Skill, sugerido por WILMOTT (1981) e definido  
481 por WARNER *et al.* (2005), foi utilizado:

$$Skill = 1 - \frac{\sum |X_{modelo} - X_{obs}|^2}{\sum (|X_{modelo} - \bar{X}_{obs}| + |X_{obs} - \bar{X}_{obs}|)^2}, \quad (3.2)$$

482 onde as variáveis  $X_{obs}$  e  $X_{modelo}$  são as propriedades observadas (componente  $v$  ou  
483 salinidade) e seus respectivos valores calculados pelos modelos analíticos, respec-  
484 tivamente. Os valores destas variáveis são comparados com as médias em profun-  
485 didade correspondentes aos valores observados, denotadas por  $\bar{X}_{obs}$ . O parâmetro  
486 Skill varia de um (1) a zero (0), indicando um ajuste perfeito entre os valores  
487 observados e calculados e completa discordância entre as propriedades, respectiva-  
488 mente.

489 O outro método utilizado para avaliar a reprodutibilidade das simulações foi  
490 o cálculo dos índices RMAE (*Relative Mean Absolute Error*) e RMSE (*Relative*

491 *Mean Square Error*). Para ambos índices, valores próximos à 0 (zero) indicam  
 492 uma boa representatividade dos dados de campo. Os valores de RMAE (Equação  
 493 3.3) são classificados conforme a qualidade dos resultados em um conjunto de  
 494 qualificações que variam de “ruim” à “excelente” (**Tab. 3**), enquanto que o índice  
 495 RMSE (Equação 3.4) é a medida da magnitude média dos erros estimados e é  
 496 dependente da variação total dos dados (WALSTRA *et al.*, 2001).

$$RMAE = \frac{\sum_{i=1}^N [X_{modelo,i} - X_{obs,i}]}{X_{obs,i}} \quad (3.3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_{modelo,i} - X_{obs,i})^2}{N}} \quad (3.4)$$

497 Onde  $N$  representa o número amostral.

Tabela 3: Qualificações quanto ao valor do índice RMAE segundo WALSTRA *et al.* (2001).

Qualificação	RMAE
Excelente	< 0,2
Boa	0,2 – 0,4
Razoável	0,4 – 0,7
Pobre	0,7 – 1,0
Ruim	> 1,0

498 De forma a aferir os limites de reprodução dos dados a partir dos coeficientes  
 499  $N_z$  e  $K_z$ , foram testados os limites inferiores e superiores destes coeficientes para  
 500 resultar em um valor intermediário de Skill. Os limites dos coeficientes  $N_z$  e  $K_z$   
 501 foram encontrados ao manter fixo os valores de  $K_z$  e  $N_z$  que geraram o maior valor  
 502 de Skill, respectivamente, e alterando-os para resultar em um Skill igual à 0,50.

503 Os coeficientes cinemáticos de viscosidade horizontais ( $N_x, N_y$ ) e vertical ( $N_z$ )  
 504 são resultado de uma parametrização do atrito viscoso, necessária devido à dificul-  
 505 dade em se medir flutuações turbulentas de velocidade em campo (REYNOLDS,  
 506 1895). Estes coeficientes estão em função das características do fluxo, indepen-  
 507 dentes do fluido em si, e são maiores conforme o fluxo for mais turbulento. Os  
 508 coeficientes cinemáticos de difusão de sal horizontais ( $K_x, K_y$ ) e vertical ( $K_z$ ) rela-  
 509 cionam o fluxo difusivo ao campo de concentração de sal, dependendo do gradiente  
 510 de concentração (FICK, 1855). Quanto maior o valor de  $K_z$ , maior a mistura ver-  
 511 tical da coluna de água.

### 512 3.3.2. Modelos Analíticos de Circulação Estuarina

513 Através de simplificações baseadas nas premissas dos modelos analíticos se-  
 514 gundo FISHER *et al.* (1972) e MIRANDA *et al.* (2002; 2012), as equações do  
 515 estado da água do mar, da continuidade e do movimento são formuladas analiti-  
 516 camente como:

$$\rho = \rho_0(1 + \bar{\beta}S) , \text{ com } \rho_0 = \text{cte}, \quad (3.5)$$

517 sendo  $\rho$  a densidade ( $\text{kg.m}^{-3}$ ),  $\rho_0$  a densidade de referência da água doce ( $\text{kg.m}^{-3}$ )  
 518 e  $\beta$  é o coeficiente de contração salina, cujo valor numérico varia muito pouco com  
 519 a salinidade (S) e pode ser considerado constante:  $\beta = 7,0 \times 10^{-4}$ ,

$$\frac{\partial(vB)}{\partial y} + \frac{\partial(wB)}{\partial z} = 0 , \text{ com } B = \text{cte}, \quad (3.6)$$

520 onde B é a largura do estuário (m),

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} (N_H \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (N_z \frac{\partial v}{\partial z}) = 0 , \quad (3.7)$$

521 com o gradiente longitudinal de pressão do primeiro membro à esquerda expresso  
522 em termos dos seus componentes barotrópico e barocínico, ou seja:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{g}{\rho} \int_{\eta}^z \frac{\partial p}{\partial y} dz , \quad (3.8)$$

523 As quantidades físicas e coeficientes numéricos apresentados acima são:  $N_H$   
524 e  $N_z$  são os coeficientes cinemáticos de viscosidade longitudinal e vertical, res-  
525 pectivamente, cujas dimensões são  $[N_H]=[N_z]=[L^2T^{-1}]$ , expressos como  $m^2 \cdot s^{-1}$  no  
526 sistema SI de unidades;  $g$  é a gravidade, considerada constante ( $9,8 m^2 \cdot s^{-1}$ );  $\eta = \eta$   
527 ( $y$ ) é a inclinação da superfície livre.

528 Com as mesmas hipóteses simplificadoras, a equação de conservação de sal,  
529  $S = S(y, z)$ , é expressa por:

$$v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial y} (K_H \frac{\partial S}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_z \frac{\partial S}{\partial z}) , \quad (3.9)$$

530  $K_H$  e  $K_z$  denotando os coeficientes cinemáticos de difusão de sal, com a seguinte  
531 dimensão:  $[K_H]=[K_z]=[L^2T^{-1}]$  ou  $m^2 \cdot s^{-1}$  no sistema SI de unidades.

532 Devido ao fato de que a densidade em estuários é primariamente controlada  
533 pela salinidade, o gradiente longitudinal de densidade ( $\partial \rho / \partial y$ ) foi substituído por  
534  $\partial \bar{s} / \partial y$ , onde  $\bar{s}$  é calculado pelo valor estacionário médio da salinidade na coluna  
535 d'água  $\langle \bar{s} \rangle$ :

$$\langle \bar{s} \rangle = \bar{s} = \frac{1}{(h + \eta)} \int_{\eta}^h S(y, z) dz \approx \frac{1}{h} \int_0^h S(y, z) dz , \quad (3.10)$$

### 536 a) Condição de Contorno Superior

537 A condição de contorno superior é que o cisalhamento na superfície seja igual  
538 ao componente longitudinal da tensão de cisalhamento do vento. A condição de  
539 contorno na superfície livre,  $z = \eta$ , pode ser expressa em função da tensão de

540 cisalhamento do vento por:

541

542  $\rho N_z \frac{\partial v}{\partial z} |_{z-\eta} = \tau_{Wy}$  (3.11a), ou em função da função corrente,  $\psi = \psi(y, z)$ :

543

544  $\rho N_z \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} |_{z-\eta} = -\tau_{Wy}$  (3.11b), com  $\tau_{Wy}$  denotando a tensão de cisalhamento do  
545 vento atuando na superfície livre.

### 546 **b) Condição de Contorno Inferior**

547 Ambos modelos hidrodinâmicos de acordo com FISHER *et al.* (1972) e MI-  
548 RANDA *et al.* (2002; 2012) sugerem soluções tanto para o perfil vertical estaci-  
549 onário do componente de velocidade  $v$ , quanto para o de salinidade, sendo que o  
550 primeiro possui como condição inferior de contorno o atrito máximo (princípio da  
551 aderência, com velocidade nula no fundo), formulada analiticamente por:

$$v(y, z)|_{z-h} = -\frac{\partial \psi}{\partial z} |_{z-h} = 0, \quad (3.12)$$

552 e o segundo o atrito moderado (com escorregamento de fundo, onde  $\tau_{By} \neq 0$ ):

$$\rho N_z \frac{\partial v}{\partial z} |_{z-h} = \tau_{By} \quad \text{ou} \quad -\rho N_z \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} |_{z-h} = -\tau_{By}, \quad (3.13)$$

553 onde  $\tau_{By}$  é a tensão de cisalhamento no fundo.

554 Para garantir a unicidade da equação de conservação de sal (Equação 3.9),  
555 deve-se impor como condições de contorno superior e inferior que o fluxo de sal  
556 através da superfície e do fundo, respectivamente, sejam iguais a zero, expressadas  
557 como:

$$\rho K_z \left( \frac{\partial S}{\partial z} \right) |_{z-\eta} = 0 \quad \text{ou} \quad \left( \frac{\partial S}{\partial z} \right) |_{z-\eta} = 0, \quad (3.14)$$

558 e

$$\rho K_z \left( \frac{\partial S}{\partial z} \right) \Big|_{z=h} = 0 \quad \text{ou} \quad \left( \frac{\partial S}{\partial z} \right) \Big|_{z=h} = 0, \quad (3.15)$$

559 Para fechar hidrodinamicamente o sistema de equações, necessita-se de mais  
 560 duas condições integrais de contorno: a Equação 3.10, que define a salinidade média  
 561 na coluna d'água, e outra originária da equação da continuidade sob condições  
 562 estacionárias, assumindo a seguinte forma:

$$B \int_{\eta}^h v(y, z) dz = Q_f, \quad (3.16)$$

563 onde  $Q_f$  é a descarga fluvial (ou do rio);  $[Q_f] = [L^3 T^{-1}]$  ou  $m^3 \cdot s^{-1}$  no sistema SI de  
 564 unidades.

### 565 c) Solução Hidrodinâmica – Atrito Máximo

566 A solução segundo FISHER *et al.* (1972) para calcular o perfil estacionário do  
 567 componente de velocidade  $v$  em função da profundidade adimensional  $Z$  (Equação  
 568 3.17a) para um estuário do tipo parcialmente misturado depende de três forçantes:  
 569 o gradiente longitudinal de densidade, a descarga fluvial e a tensão de cisalhamento  
 570 do vento (primeiro, segundo e terceiro termos, respectivamente). A formulação do  
 571 perfil estacionário de salinidade (Equação 3.18) está em função da velocidade lon-  
 572 gitudinal calculada na superfície livre,  $v = v(y, 0)$ , Equação 3.17b, sendo portanto  
 573 também função do gradiente longitudinal da densidade, da descarga fluvial e da  
 574 tensão de cisalhamento do vento na superfície livre.

$$\begin{aligned} v(y, Z) = & \frac{gh^3}{N_z} \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial y} (0, 167Z^3 - 0, 188Z^2 + 0, 0208) \\ & + v_f (-1, 5Z^2 + 1, 5) + \frac{\tau_{W_y} h}{\rho N_z} (0, 75Z^2 - Z + 0, 25) \end{aligned} \quad (3.17a)$$

575

576

$$v(y, 0) = 0,0208 \frac{gh^3}{N_z} \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial y} + 1,5v_f + 0,25 \frac{\tau_{Wy}h}{\rho N_z}, \quad (3.17b)$$

577 onde  $v_f$  é a velocidade gerada pela descarga fluvial ( $\text{m.s}^{-1}$ ).

578

$$S(y, Z) = \bar{s} + \left( \frac{h^2}{K_z} \frac{\partial \bar{s}}{\partial y} \right) v(y, 0) [(0,4Z^5 - 0,75Z^4 + 0,5Z^2 - 0,083) \\ + v_f(-0,6Z^5 + Z^4 - 0,1)]. \quad (3.18)$$

579

#### d) Solução Hidrodinâmica – Atrito Moderado

580

581

582

583

584

585

586

587

A solução segundo MIRANDA *et al.* (2002; 2012) permite calcular o perfil estacionário do componente de velocidade  $v$  em função da profundidade adimensional  $Z$  (Equação 3.19a) para um estuário do tipo bem misturado. Assim como na solução com atrito máximo, o componente de velocidade  $v$  depende do gradiente longitudinal de densidade, da descarga fluvial e da tensão de cisalhamento do vento. A equação do perfil estacionário de salinidade (Equação 3.20) com condição de atrito moderado também se assemelha à solução com atrito máximo, estando em função da velocidade longitudinal calculada na superfície livre (Equação 3.19b):

588

$$v(y, Z) = \frac{gh^2}{kv_0} \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial y} (0,167Z^3 - 0,296Z^2 - 0,058) \\ + v_f(1,106Z^2 + 0,63) + \frac{\tau_{Wy}}{\rho kv_0} (0,316Z^2 - Z + 0,395), \quad (3.19a)$$

589

onde  $k$  é o coeficiente de atrito adimensional na coluna d'água.

$$v(y, 0) = -0,058 \frac{gh^2}{kv_0} \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial y} + 0,63v_f + 0,395 \frac{\tau_{Wy}}{\rho kv_0} \quad (3.19b)$$

$$S(y, Z) = \bar{s} + \left(\frac{h^2}{K_z} \frac{\partial \bar{s}}{\partial y}\right) v(y, 0) [(0, 144Z^5 - 0, 425Z^4 + 0, 5Z^2 - 0, 105) \\ + v_f(-0, 091Z^5 + 0, 36Z^4 - 0, 057)] . \quad (3.20)$$

### 3.3.3. Quantificação das Magnitudes das Forçantes

As magnitudes das forçantes podem ser calculadas de duas formas no perfil estacionário de velocidade do componente  $v$ : i) desconsiderando a variação no eixo vertical e, portanto, desconsiderando os coeficientes das profundidades adimensionais  $Z$  das Equações 3.17a e 3.19a; ii) considerando os coeficientes de  $Z$  e efetuando uma média das magnitudes ao longo de todas as profundidades adimensionais. Como as magnitudes das forçantes nos perfis médios de salinidade são obtidas através das velocidades longitudinais calculadas na superfície (Equação 3.17b e 3.19b), não há a possibilidade de contabilizar a variação na vertical das magnitudes.

A segunda (ii) opção de quantificação das magnitudes das forçantes foi aplicada neste trabalho porque a primeira (i) opção foi tendenciosa por sempre resultar em menores magnitudes da tensão de cisalhamento do vento, inclusive podendo ser desprezadas. Conforme a segunda opção de quantificação das magnitudes foi testada, passou-se a observar a interação da tensão de cisalhamento do vento com as demais forçantes dependendo da intensidade de descarga fluvial atuante.

### 3.3.4. Média dos Valores dos Parâmetros de Entrada dos Modelos Analíticos

Os parâmetros de entrada utilizados nos modelos analíticos que se mantiveram constantes em todas as simulações são apresentados na **Tabela 4**. Já os demais

611 parâmetros que variaram de acordo com os diferentes ciclos de enchente-vazante  
 612 são mostrados na **Tabela 5** na forma de médias ao longo de todas as simulações.  
 613 Apesar de se tratar de um ponto de fundeio e do gradiente de densidade vertical  
 614 poder ser considerado praticamente nulo (MÖLLER & CASTAING, 1999), valores  
 615 entre 0,001 e 0,005 kg.m<sup>-4</sup> foram adotados nos modelos com sucesso. Para o cálculo  
 616 de  $v_0$ , a amplitude da onda de maré utilizada foi de  $a = 0,3$  m de acordo com a  
 617 amplitude média segundo MÖLLER *et al.* (2007).

Tabela 4: Parâmetros de entrada dos modelos constantes em todas simulações.

Parâmetros	Valores
$g$	9,8 m.s <sup>-1</sup>
$h$	15 m
$v_0$	0,23 m.s <sup>-1</sup>
$\rho_0$	1,0x10 <sup>3</sup> kg.m <sup>-3</sup>
$Z$	[2,3/15; 3,8/15;...; 12,8/15]
$\rho_{ar}^*$	1,3 kg.m <sup>-3</sup>
$C_d^{**}$ se $V < 6$ m.s <sup>-1</sup>	1,1x10 <sup>-3</sup>

$\rho_{ar}^*$ : densidade do ar (kg.m<sup>-3</sup>);  $C_d^{**}$ : coeficiente de arrasto do vento. Se  $V > 6$  m.s<sup>-1</sup>,  $C_d = 0,61 + 0,063|V|10^{-3}$ .

Tabela 5: Valores médios dos parâmetros de entrada dos modelos ao longo de todos ciclos de enchente-vazante.

Parâmetros	Valores Médios
$\frac{\partial \rho}{\partial y}$	$2,4 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^{-4}$
$N_z$	$2,2 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
$K_z$	$5 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
$\bar{s}$	17,70 ‰
$k$	$6,3 \times 10^{-4}$
$v_f$	-0,19 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
$\tau_{W_y}$	$-6,9 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$

## 618 Capítulo 4

# 619 RESULTADOS

### 620 4.1. Análises Hidrográficas dos Dados de Campo

#### 621 4.1.1. Séries Temporais

622 As séries temporais dos dados de descarga fluvial, velocidade do componente  
623  $V$  do vento e de salinidade estão apresentadas de forma a coincidir o seu período  
624 amostral com o dos dados de velocidade de corrente, ou seja, iniciando em 17 de  
625 agosto de 2005 e com término em 31 de dezembro de 2011. O comportamento  
626 da descarga fluvial no ano de 2005 (**Fig. 8**) foi de alta intensidade até o mês de  
627 novembro, oscilando entre picos que apresentam pelo menos o dobro da descarga  
628 média anual para a lagoa ( $2.400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ). O valor máximo atingido foi de aproxima-  
629 damente  $12.000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  entre os meses de outubro e novembro, contrastando com  
630 o valor mínimo de apenas  $248 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  observado no final de dezembro. A descarga  
631 fluvial média deste ano foi de  $2.393 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , que coincide com a média anual de  
632  $2.400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  para a Lagoa dos Patos. O desvio padrão deste ano foi igual à  $2.126$   
633  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , muito alto devido à grande variabilidade nas vazões deste ano.

634 A descarga fluvial do ano de 2006 (**Fig. 8**) foi baixa na maior parte do ano,

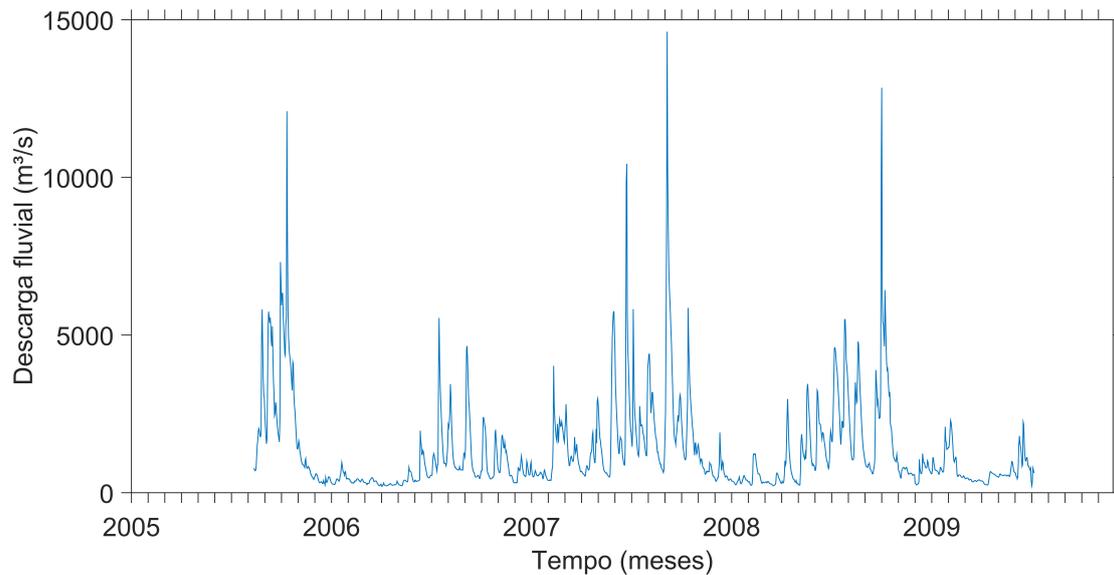


Figura 8: Série temporal de descarga fluvial dos anos de 2005 a 2009.

635 apresentando um valor médio igual a  $800 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ . As intensidades se mantêm  
636 abaixo de  $500 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  do início da série temporal até o meio do mês de junho,  
637 período no qual o valor mínimo é observado ( $197 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ). Posteriormente, picos  
638 de descarga fluvial de moderada intensidade entram em ação, dentre eles estando  
639 o valor máximo de aproximadamente  $5.500 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  encontrado no final de julho.  
640 A partir do mês de outubro, a intensidade da descarga fluvial volta a diminuir,  
641 apresentando valores menores do que  $2.000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ . O desvio padrão de 2006 foi de  
642  $772 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ , também próximo da média conforme ano anterior.

643 O ano de 2007 foi marcado por descargas fluviais que variam de baixas a mo-  
644 deradas até o mês de junho (**Fig. 8**), com valores não superiores a  $\sim 5.000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ .  
645 Observam-se picos com magnitudes significativas de junho a novembro, especial-  
646 mente no início do mês de julho ( $\sim 10.500 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ) e fim de setembro, este último  
647 apresentando o valor máximo de descarga fluvial ( $14.624 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ). Após o mês de  
648 novembro, a descarga fluvial diminui, sendo menor do que  $2.000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  e chegando  
649 a seu valor mínimo de  $352 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  no final de dezembro. A descarga fluvial média

650 deste ano foi moderada ( $1.789 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), apresentando um valor de desvio padrão  
651 bastante próximo ( $1.691 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ).

652 No geral, a descarga fluvial do ano de 2008 (**Fig. 8**) apresentou intensidades  
653 moderadas, com um valor médio igual à  $1.444 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . O período abrangido pelos  
654 meses de janeiro a maio foi composto por descargas fluviais baixas, com o valor  
655 mínimo ( $219 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) sendo pertencente ao mês de abril. As intensidades não ul-  
656 trapassam  $5.000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  até o meio do mês de agosto, sendo que posteriormente  
657 apenas se observa um pico significativo correspondente à máxima descarga fluvial  
658 ( $12.847 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) no final de outubro. Ocorre um decaimento brusco próximo ao final  
659 do ano, apresentando valores ao redor de  $700 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . O desvio padrão deste ano  
660 foi igual à  $1.500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , não apenas se aproximando da média conforme os anos  
661 anteriores, mas ultrapassando este valor.

662 A descarga fluvial do ano de 2009 (**Fig. 8**) foi extremamente baixa em relação  
663 aos demais anos devido a sua estimativa ser duvidosa pela presença de uma falha  
664 que cobre todo período de inverno, não apresentando picos significantes e possuindo  
665 um valor médio igual à  $740 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Somente dois picos de descarga fluvial podem  
666 ser observados, ambos possuindo intensidades similares: o primeiro, encontrado no  
667 início do mês de março, correspondente à máxima descarga fluvial ( $2.294 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ); o  
668 segundo, localizado entre os meses de julho e agosto, apresentando uma intensidade  
669 igual à  $2.237 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . A menor descarga fluvial foi de  $221 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , observada no final  
670 do mês de julho. Diferentemente dos outros anos já descritos, o desvio padrão do  
671 ano de 2009 foi quase a metade do valor da média anual, sendo igual à  $420 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

672 O ano de 2010 apresenta uma falha de três meses no verão, sendo considerado de  
673 moderada intensidade da descarga fluvial (**Fig. 9**) considerando os outros meses,  
674 possuindo um valor médio igual à  $1.770 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Descargas fluviais intermediárias  
675 estendem-se do início da série temporal até o mês de outubro, apresentando quatro  
676 picos de intensidade onde o valor máximo ( $7.944 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) está inserido, sendo obser-

677 vado no final de julho. Após este período, ocorre uma diminuição das magnitudes  
 678 para valores ao redor de  $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , chegando ao valor mínimo de  $314 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  no  
 679 início do mês de novembro. De acordo com a maioria dos anos anteriores, o desvio  
 padrão deste ano ( $1.539 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) apresentou um valor próximo da média anual.

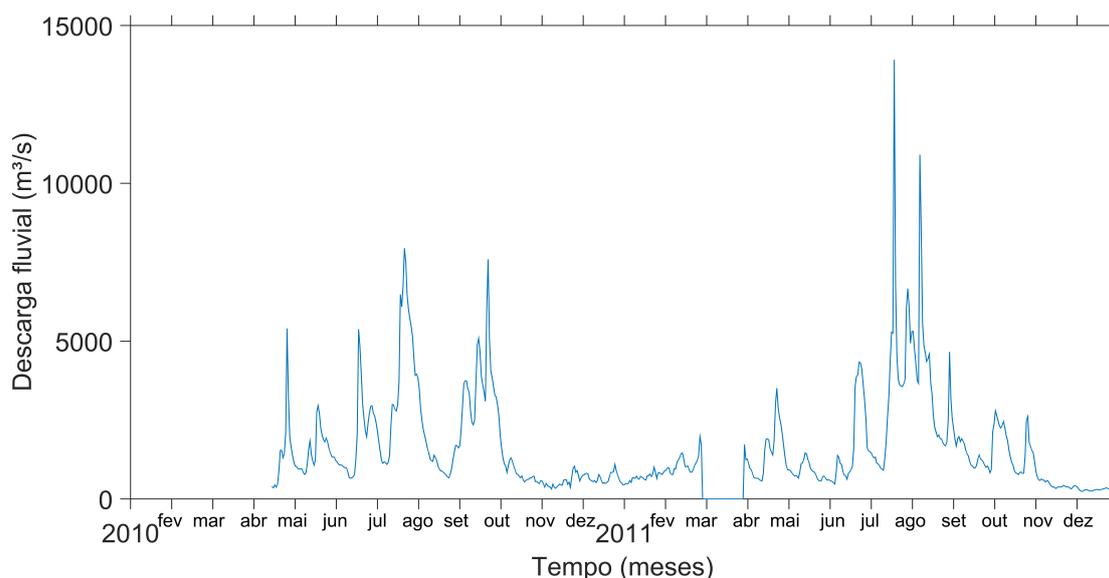


Figura 9: Série temporal de descarga fluvial dos anos de 2010 a 2011.

680

681 A descarga fluvial do ano de 2011 apresentou uma falha temporal que cobre  
 682 todo o mês de março (**Fig. 9**), sendo classificada como intermediária ( $1.422 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )  
 683 considerando o resto do período. Altas descargas fluviais somente foram observa-  
 684 das do meio do mês de julho a início de agosto, enquanto que o restante do ano  
 685 possuiu vazões que variam de baixas a moderadas. Os valores máximo e mínimo  
 686 de descarga fluvial foram iguais à  $13.915 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  — observado em meio de julho  
 687 — e  $243 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  — encontrado em dezembro —, respectivamente. Similarmente ao  
 688 ano de 2008, o desvio padrão de 2011 foi maior do que o valor da média anual,  
 689 sendo igual à  $1.575 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

690 As demais séries temporais — velocidade dos componentes  $V$  e  $v$  do vento e  
 691 da corrente integrada na vertical, respectivamente, e salinidade na superfície e no

692 fundo — seguem dois padrões, basicamente:

- 693 • **Padrão 1:** Em períodos de baixa descarga fluvial, os ventos de N (S) pro-  
694 vocam velocidades de corrente de vazante (enchente) e baixos (altos) valores  
695 de salinidade — tanto na superfície, quanto no fundo;
- 696 • **Padrão 2:** Após picos de descarga fluvial, os ventos de S apenas causam  
697 enfraquecimento nas velocidades de vazante ou as deixam próximas de zero,  
698 sem alterar a direção do fluxo para enchente; a salinidade na superfície é  
699 baixa devido à corrente de vazante, enquanto que a salinidade no fundo  
700 apresenta um pico de intensidade referente à atuação do vento S.

701 Este comportamento dos dados em alta descarga fluvial acontece porque os  
702 ventos de S não são intensos o suficiente para competir com a intensa vazão e  
703 gerar movimentos de enchente em toda coluna d'água, restringindo-se ao fundo  
704 como confirmado pelos picos de salinidade apenas nesta profundidade.

705 No ano de 2005 (**Fig. 10**), o padrão 1 é observado somente no início da série  
706 temporal e após o mês de novembro, quando a descarga fluvial é baixa. O padrão  
707 2 estende-se de setembro a meio de novembro, ocupando praticamente todo ano  
708 por este apresentar somente as estações de inverno e primavera. O ano de 2006  
709 é composto quase que em sua totalidade pelo padrão 1 devido as suas baixas  
710 descargas fluviais, sendo possível presenciar o padrão 2 apenas no final de julho  
711 e meio de setembro, próximos aos picos de vazão. O padrão 2 compõe as séries  
712 temporais do ano de 2007 até o mês de outubro nas ocasiões em que a descarga  
713 fluvial é maior do que  $4.000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Já o padrão 1 é observado no restante do ano.  
714 A maior parte do ano de 2008 é ocupada pelo padrão 1, inclusive havendo casos  
715 onde fracos ventos de N provocaram regimes de enchente, a exemplo do evento  
716 localizado no meio do mês de maio. O padrão 2 foi observado somente no meio  
717 do mês de setembro e no início de novembro, logo após dois picos de descarga

718 fluvial. Similarmente ao ano de 2008, o ano de 2009 apresentou o padrão 1 em sua  
 719 maioria, também com ocorrências de regimes de enchente associados a vento de  
 720 N. O padrão 2 foi referente aos dois picos de descarga fluvial presentes neste ano,  
 721 podendo ser observado no início do mês de março e final do mês de julho.

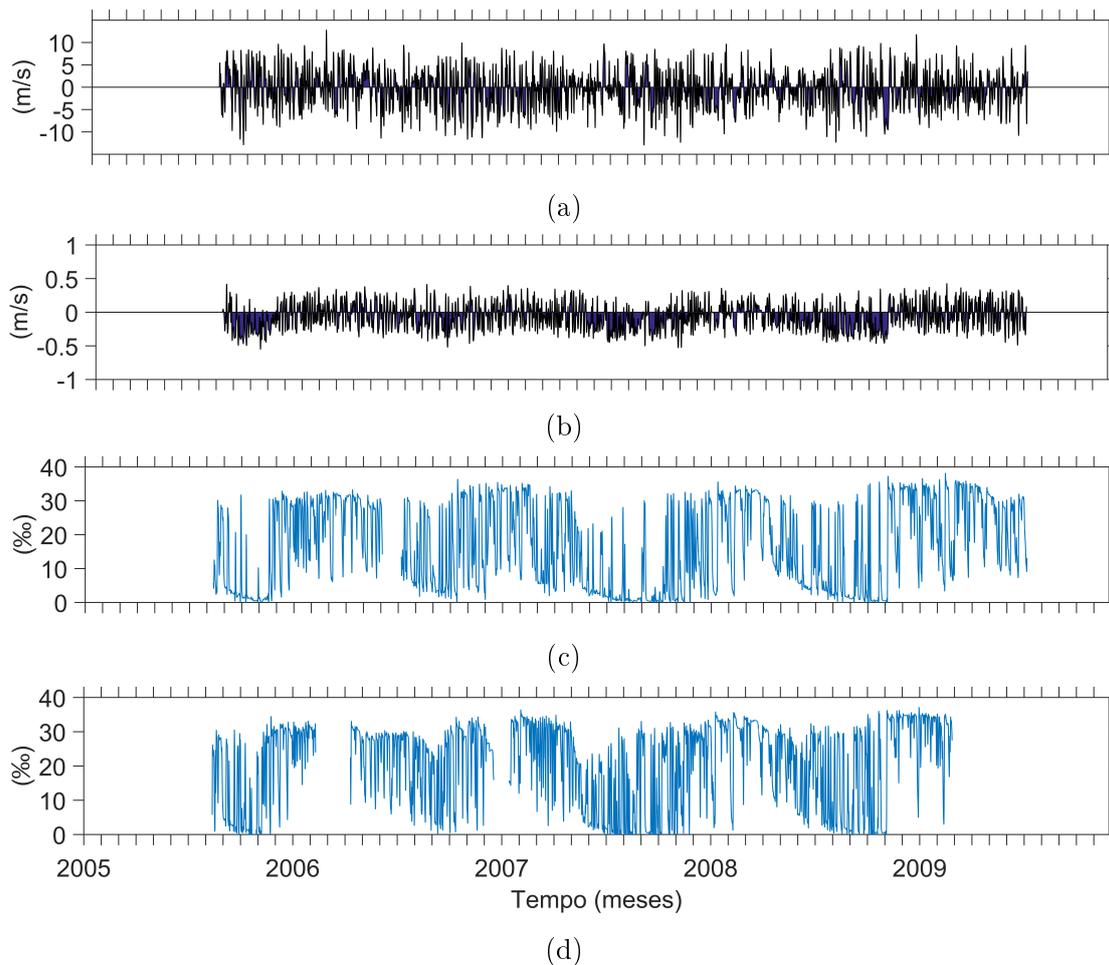


Figura 10: Séries temporais dos anos de 2005 a 2009 de (a) velocidade do componente  $V$  do vento, (b) velocidade do componente  $v$  da corrente integrada verticalmente, (c) salinidade na superfície e (d) salinidade no fundo.  $V > 0$  e  $V < 0$  representam velocidades de ventos de S e de N, e  $v > 0$  e  $v < 0$  as velocidades de enchente e de vazante, respectivamente.

722 No ano de 2010 (**Fig. 11**), há uma correspondência entre os quatros maiores  
 723 picos de descarga fluvial e a ocorrência do padrão 2 nas séries temporais, apresen-

724 tando uma pequena defasagem entre os dois. O padrão 1 é observado no restante  
725 do ano associado a menores intensidades de descarga fluvial. O ano de 2011 foi  
726 atípico pelo motivo de possuir maior salinidade na superfície do que no fundo em  
727 sua maioria. Apesar disso, claramente se detecta o padrão 2 nas séries temporais  
728 de salinidade ocupando o período entre julho a outubro, correspondente ao má-  
729 ximo de descarga fluvial. O padrão 1 é observado no restante do ano, ocorrendo  
730 um caso onde um enfraquecimento no vento de N provocou um regime de enchente  
731 no final do mês de novembro, podendo ser atribuído à baixa intensidade de vazão.

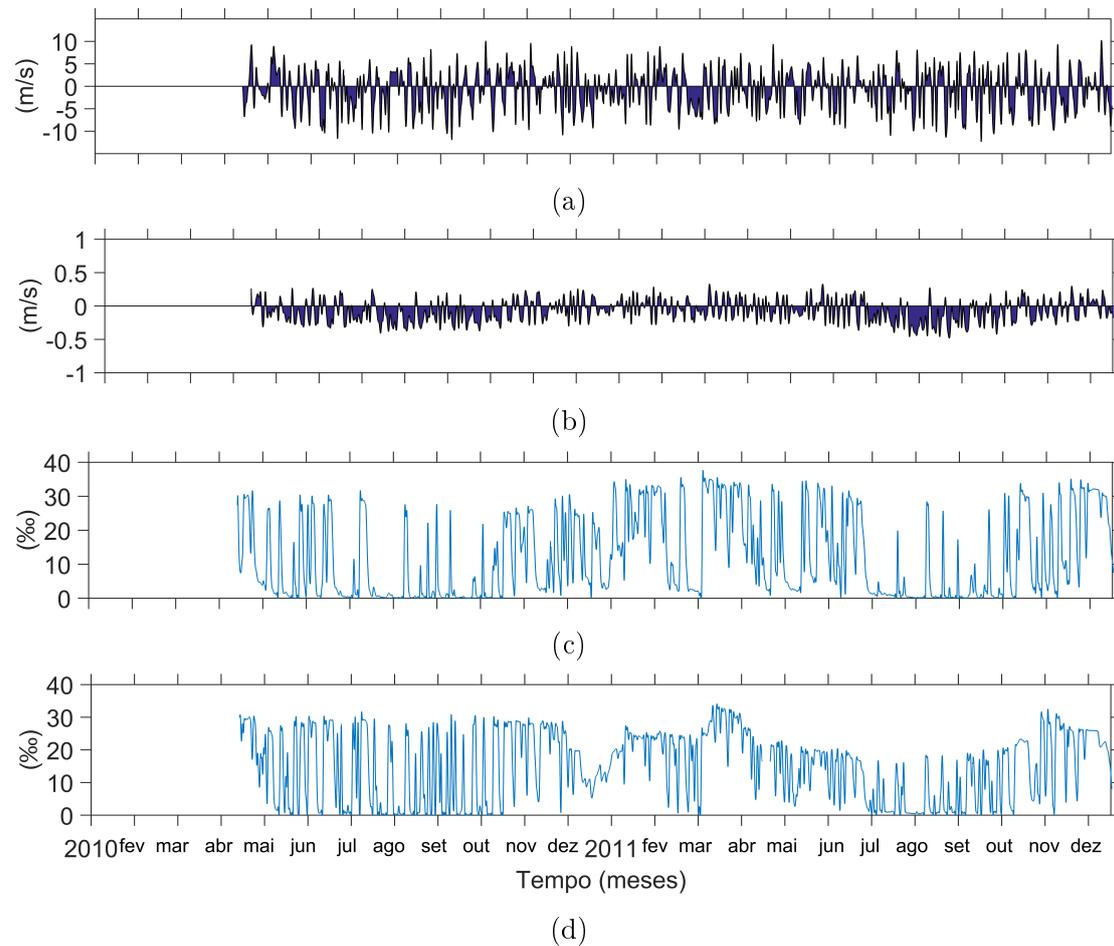


Figura 11: Séries temporais dos anos de 2010 a 2011 de **(a)** velocidade do componente  $V$  do vento, **(b)** velocidade do componente  $v$  da corrente integrada verticalmente, **(c)** salinidade na superfície e **(d)** salinidade no fundo.  $V > 0$  e  $V < 0$  representam velocidades de ventos de S e de N, e  $v > 0$  e  $v < 0$  as velocidades de enchente e de vazante, respectivamente.

### 732 4.1.2. Análises Estatísticas

733 Nesta seção, serão apresentadas as médias e desvio padrão dos dados de campo  
 734 — exceto da descarga fluvial, inseridos na seção anterior — para cada ano, bem  
 735 como distribuições de frequência, médias e oscilações mensais do período estudado.

#### 736 4.1.2.1. Descarga Fluvial

737 De acordo com a distribuição de frequência da descarga fluvial apresentada na  
738 **Figura 12**, as suas intensidades foram menores do que  $1.500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  aproximada-  
739 mente 68 % do tempo, enquanto que a faixa que cobre a média anual para a Lagoa  
740 dos Patos ( $1.500 - 3.000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) correspondeu a menos do que 20 % do tempo.  
741 Descargas fluviais maiores do que  $3.000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  foram responsáveis por um total de  
742  $\sim 12$  % das observações, apenas.

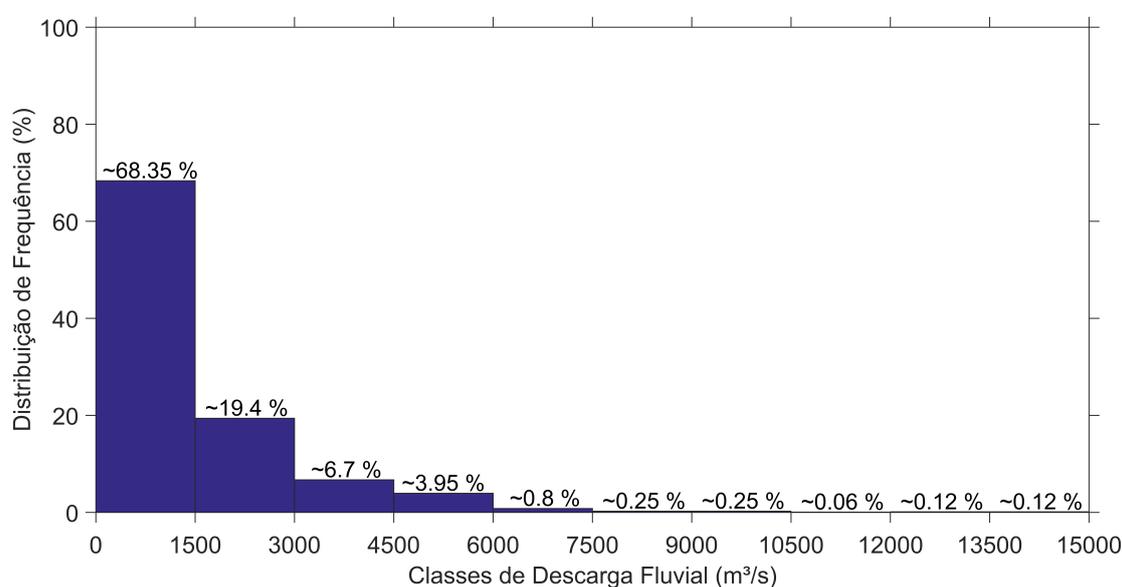


Figura 12: Distribuição de frequência da descarga fluvial para todo o período de estudo.

743 Analisando as médias mensais da descarga fluvial (**Fig. 13**), valores menores  
744 do que  $1.500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  se estenderam do mês de janeiro a junho, posteriormente  
745 apresentando descargas fluviais altas ( $> 2.500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) entre os meses de julho e  
746 outubro. A partir de novembro, as intensidades retornam a valores próximos de  
747  $1.500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , atingindo o mínimo de  $\sim 550 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  em dezembro. A máxima média  
748 mensal de descarga fluvial é observada em setembro, com um valor aproximado de  
749  $2.600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

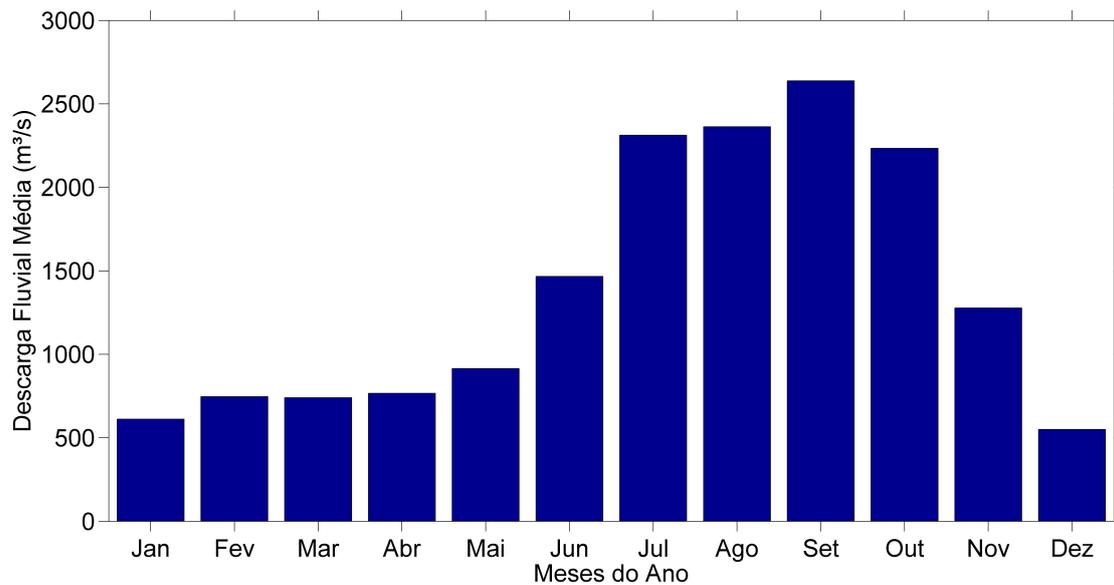


Figura 13: Médias mensais da descarga fluvial para todo o período de estudo.

750 Quanto às anomalias de descarga fluvial no entorno da média geral (**Fig. 14**),  
751 os meses de junho e novembro foram os que mais se aproximaram deste valor,  
752 apresentando pequenas anomalias positivas e negativas, respectivamente. Do mês  
753 de janeiro a junho, as médias mensais foram menores do que a média geral, dimi-  
754 nuindo essa diferença linearmente com o passar do tempo. O período entre julho a  
755 outubro foi marcado por anomalias positivas maiores do que  $800 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , chegando  
756 ao máximo de  $\sim 1.200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  em setembro. As diferenças são novamente negativas  
757 no final do ano, sendo que a maior anomalia negativa do conjunto de dados é  
758 pertencente ao mês de dezembro ( $\sim -900 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ).

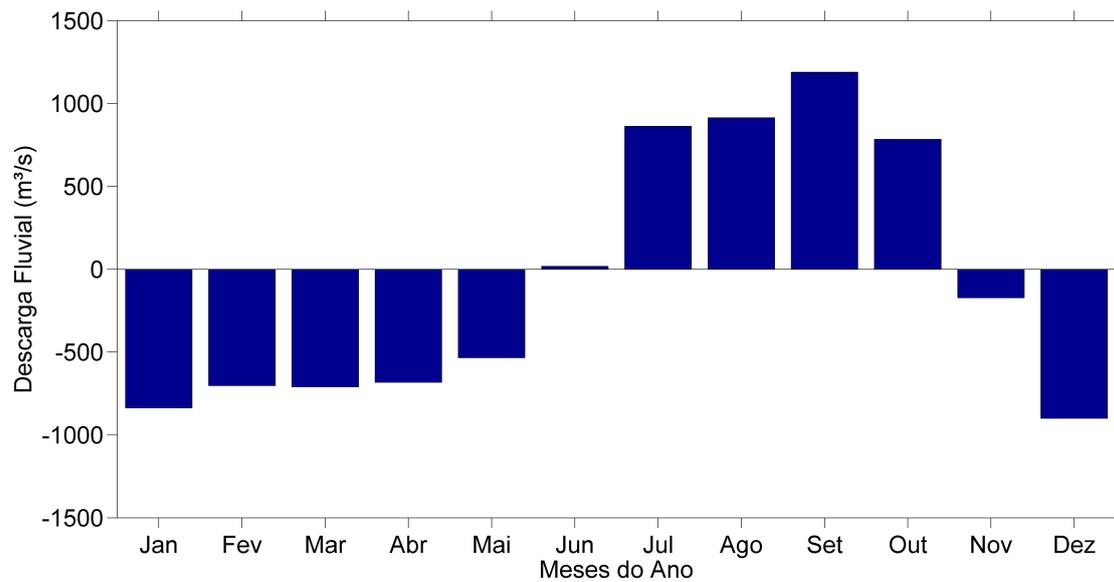


Figura 14: Anomalias mensais de descarga fluvial no entorno da média geral ( $1.450 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) e considerando todo o período de estudo.

#### 759 4.1.2.2. Velocidade do Vento

760 Segundo os diagramas de rosa dos ventos (**Figuras 15 e 16**), o ano que apresen-  
761 tou as maiores velocidades máximas foi o ano de 2006 (**Fig. 15b**), com velocidades  
762 entre  $16$  e  $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  na direção de Oeste. Em maioria, as máximas estiverem entre  
763  $14$  e  $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  e pertenceram ao quadrante de ventos NE, sendo que a direção S  
764 também foi importante no ano de 2011 (**Fig. 16c**). Por outro lado, as máximas  
765 velocidades de ventos SO geralmente se mantiveram entre  $10$  e  $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , sendo  
766 que as velocidades mais frequentes nesta direção foram de  $4$  a  $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Ventos  
767 pertencentes ao quadrante NE foram os mais observados, no geral com frequências  
768 entre  $10$  a  $15 \%$  dos casos, mas que ultrapassam esta marca no ano de 2008 (**Fig.**  
769 **15d**). As velocidades mais observadas dentro deste quadrante variaram entre  $6$  e  $8$   
770  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Ventos do quadrante SO estiveram presentes em  $5$  a  $10 \%$  das observações,  
771 apresentando frequências pouco maiores do que  $10 \%$  nos anos de 2005 (**Fig. 15a**)  
772 e 2009 (**Fig. 16a**).

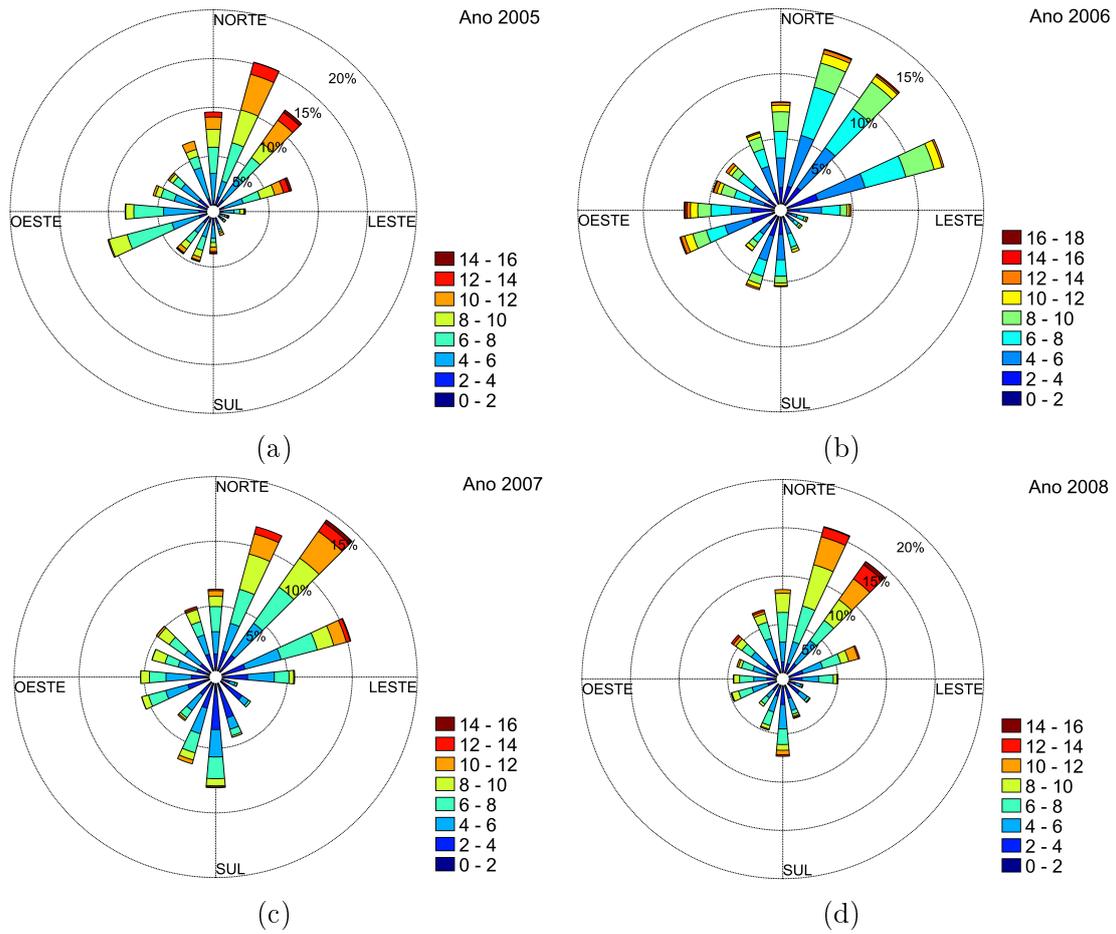


Figura 15: Rosa dos ventos dos anos de (a) 2005, (b) 2006, (c) 2007 e (d) 2008. As intensidades estão em  $m.s^{-1}$  e as porcentagens representam as frequências acumuladas de cada direção.

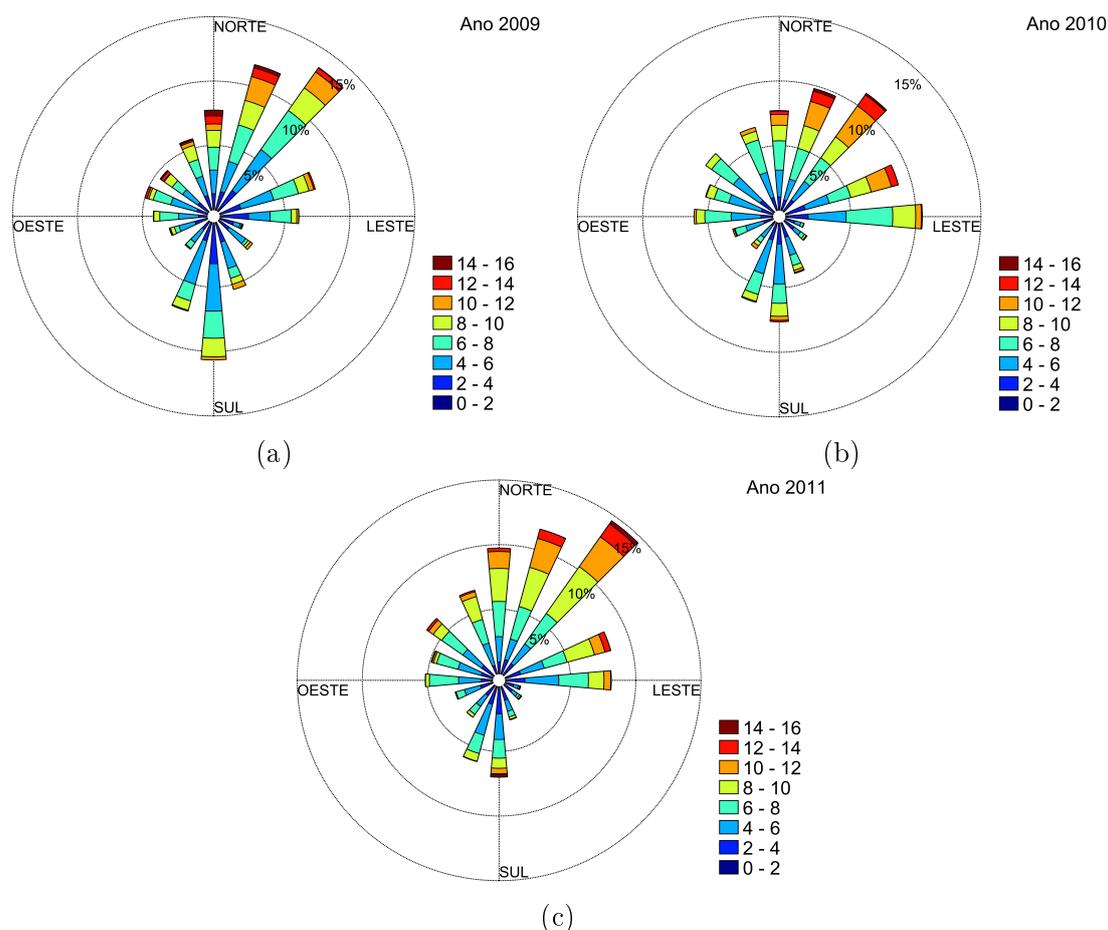


Figura 16: Rosa dos ventos dos anos de (a) 2009, (b) 2010 e (c) 2011. As intensidades estão em  $\text{m.s}^{-1}$  e as porcentagens representam as frequências acumuladas de cada direção.

774 Considerando todo o período de estudo, a direção de vento NE representou  
 775 quase a metade de todas observações (**Fig. 17**), enquanto que a direção de SO  
 776 contabilizou apenas 20 %, aproximadamente. No total, ventos do quadrante N  
 777 atuaram no entorno de 66 % dos casos.

778 Quanto às velocidades do vento paralelo à costa (**Fig. 18**), magnitudes entre -5  
 779 e  $5 \text{ m.s}^{-1}$  foram predominantes, ocorrendo em 61,5 % dos casos. Os valores médios  
 780 dos ventos de NE e SO foram de  $-5,17 \text{ m.s}^{-1}$  e  $3,36 \text{ m.s}^{-1}$ , respectivamente, contabi-  
 781 lizando todo o período de estudo. A distribuição de frequência das velocidades do

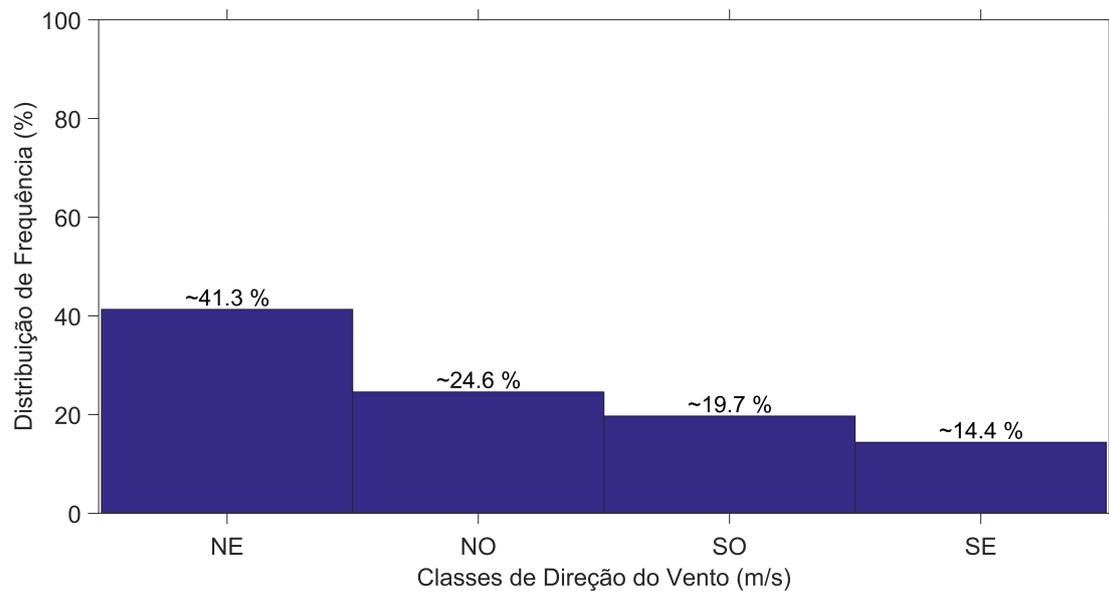


Figura 17: Distribuição de frequência das direções do vento para todo o período de estudo.

782 vento paralelo ao canal do estuário foi suprimida por apresentar comportamento  
783 similar ao vento longitudinal à costa.

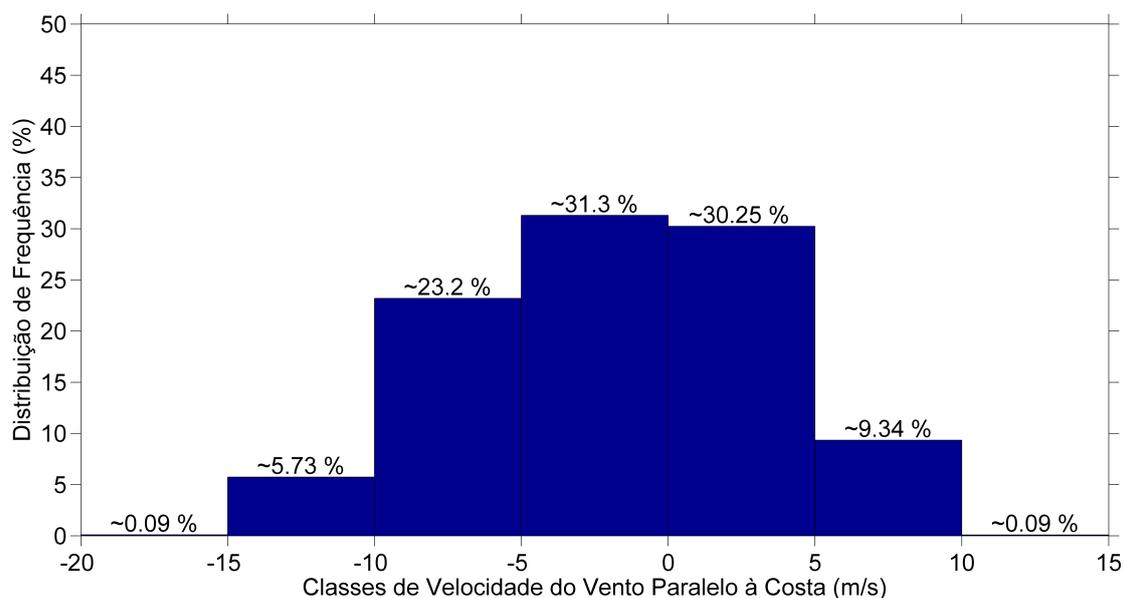


Figura 18: Distribuição de frequência da velocidade do vento longitudinal à costa para todo o período de estudo. Valores positivos e negativos representam velocidades de ventos de SO e de NE, respectivamente.

784 As médias mensais dos ventos NE (**Fig. 19**) foram maiores do que  $-5 \text{ m.s}^{-1}$   
 785 durante as estações de verão, inverno e primavera, com a máxima ( $\sim -6 \text{ m.s}^{-1}$ )  
 786 sendo observada no mês de novembro. O valor mínimo ocorre durante a estação  
 787 de outono nos meses de maio e abril, sendo aproximadamente igual à  $-3,8 \text{ m.s}^{-1}$ .  
 788 Quanto aos ventos de SO, as médias mensais apresentaram valores maiores do que  
 789  $3 \text{ m.s}^{-1}$  no mês de maio e nas estações de inverno e primavera, com o máximo sendo  
 790 encontrado no mês de setembro ( $\sim 4 \text{ m.s}^{-1}$ ). As magnitudes perdem intensidade  
 791 durante o verão — mínimo de aproximadamente  $2,8 \text{ m.s}^{-1}$  em fevereiro —, além  
 792 da estação de outono e início do inverno.

793 As anomalias dos ventos de SO (**Fig. 20**) foram negativas quase que inteiramente até o mês de julho, assumindo valores positivos nas estações de inverno  
 794 e primavera. Já para os ventos de NE, estas anomalias foram negativas do mês  
 795 de abril a agosto, sendo maiores do que a média geral no restante do tempo. As  
 796 médias mensais dos ventos de NE e de SO foram mais próximas da média geral  
 797

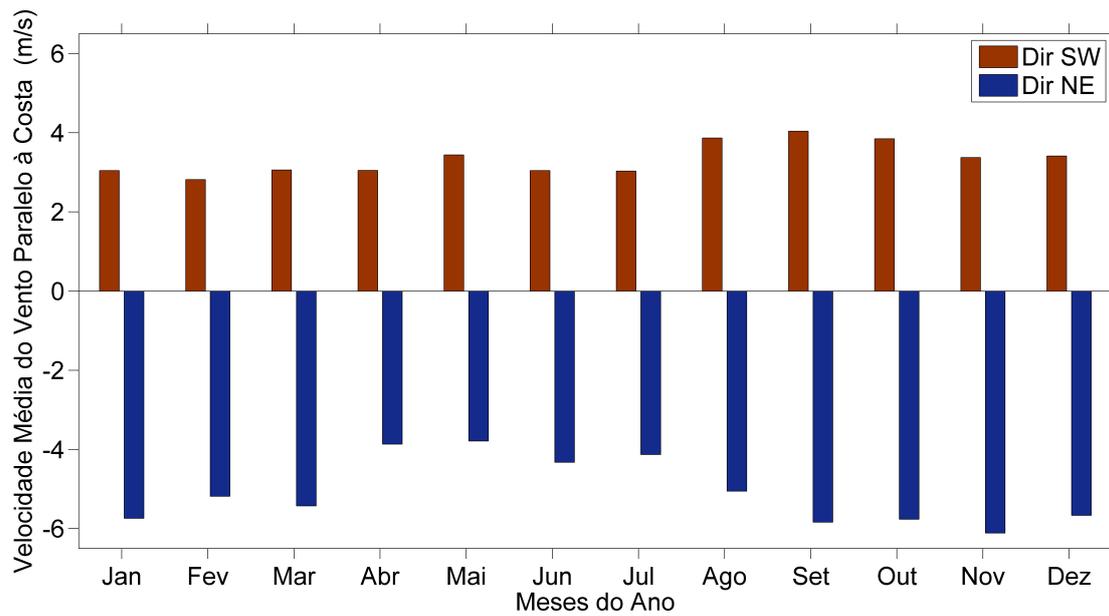


Figura 19: Médias mensais da velocidade do vento paralelo à costa (direções NE e SO) para todo o período de estudo.

798 durante os meses de fevereiro e novembro, respectivamente. Quanto às máximas  
799 anomalias positivas dos ventos de SO e NE, elas foram aproximadamente 0,7 e 0,95  
800  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , respectivamente, e observadas nos meses de setembro e novembro, respecti-  
801 vamente. A máxima anomalia negativa do vento de SO foi observada no mês de  
802 fevereiro ( $\sim -0,55 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), enquanto que para o vento de NE ela foi correspondente  
803 ao mês de maio ( $\sim -1,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

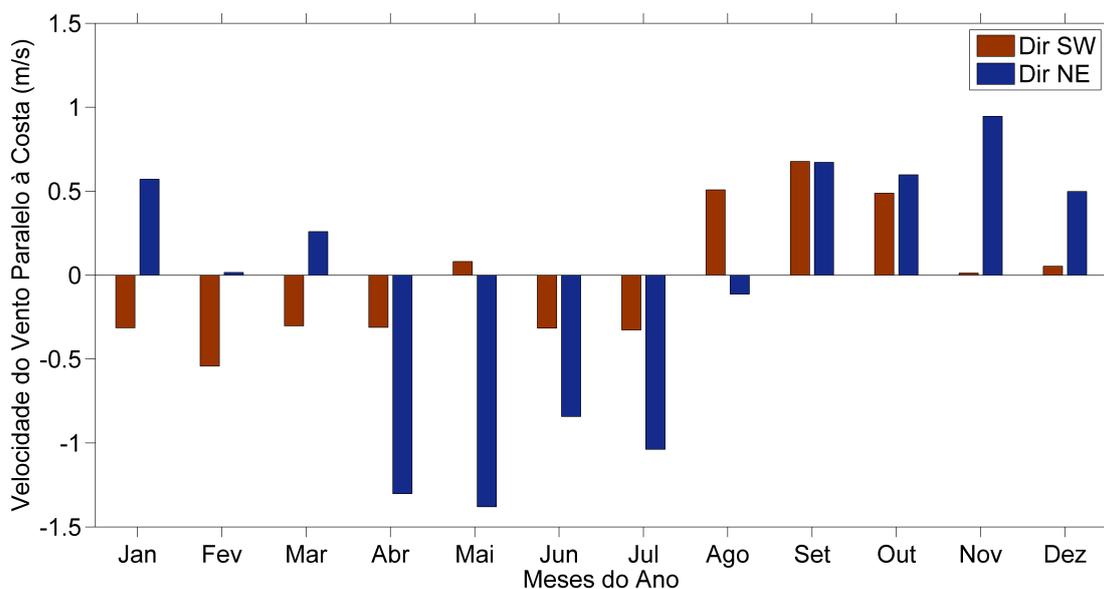


Figura 20: Anomalias mensais da velocidade do vento paralelo à costa no entorno das médias nas direções NE ( $-5,17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) e SO ( $3,36 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) considerando todo o período de estudo.

#### 804 4.1.2.3. Velocidade da Corrente Longitudinal ao Canal Integrada Ver- 805 ticalmente

806 Analisando separadamente as direções de enchente e vazante da corrente inte-  
807 grada na vertical (**Tab. 6**), as velocidades médias de vazante foram todas maiores  
808 do que as de enchente, sendo bastante próximas uma da outra no ano de 2009,  
809 onde a máxima velocidade média de enchente ( $0,16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) foi observada. O ano  
810 de 2009 também foi o ano que apresentou maior ocorrência de velocidades de en-  
811 chente na coluna de água como um todo (45,2 % do tempo enchendo) e máxima  
812 velocidade de enchente ( $0,43 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). O ano de 2005 foi responsável pela maior  
813 velocidade média e máxima de vazante, que foram iguais a  $-0,23$  e  $-0,55 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  
814 respectivamente, além de possuir a maior porcentagem de ocorrência da coluna de  
815 água vazando por completo (76,7 %). Estas constatações sobre os anos de 2005 e  
816 2009 estão em concordância com suas médias anuais de descarga fluvial, sendo a

817 maior delas pertencente ao ano de 2005 ( $2.393 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) e a menor ao ano de 2009  
818 ( $740 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ).

819 Contabilizando todos os anos, as médias gerais da corrente longitudinal inte-  
820 grada verticalmente nas direções de enchente e de vazante foram iguais a 0,13 e  
821  $-0,18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , respectivamente.

Tabela 6: Médias, porcentagem de ocorrência e valores máximos dos dados de velocidade do componente  $v$  da corrente (integrada verticalmente) para todo período de estudo. “Ench.” e “Vaz.” representam as direções de enchente e vazante, respectivamente.

	Média ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )		Ocorrência (%) ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )		Máximo ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	
	Ench.	Vaz.	Ench.	Vaz.	Ench.	Vaz.
2005	0,13	-0,23	23,3	76,7	0,42	-0,55
2006	0,14	-0,17	40,5	59,5	0,42	-0,52
2007	0,13	-0,19	31,2	68,8	0,40	-0,53
2008	0,13	-0,20	33,3	66,7	0,36	-0,47
2009	0,16	-0,17	45,2	54,8	0,43	-0,49
2010	0,11	-0,17	28,1	71,9	0,27	-0,41
2011	0,11	-0,17	35,7	64,3	0,33	-0,48

822 Analisando a distribuição de frequência da velocidade do componente  $v$  inte-  
823 grado verticalmente (**Fig. 21**), um total de aproximadamente 77 % das ocorrências  
824 foram de velocidades na faixa entre  $-0,25$  a  $0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . O percentual de tempo em  
825 que as velocidades foram de vazante em toda coluna de água ( $\sim 65,4 \%$ ) foi quase  
826 o dobro do tempo em que elas foram de enchente ( $\sim 34,6 \%$ ). Ao considerar que  
827 velocidades instantâneas em período de estofa variam entre  $-0,1$  a  $0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , as  
828 frações de tempo em que todas profundidades estavam vazando, enchendo ou em  
829 estofa foram iguais a 56,7, 26,7 e 16,6 %, respectivamente.

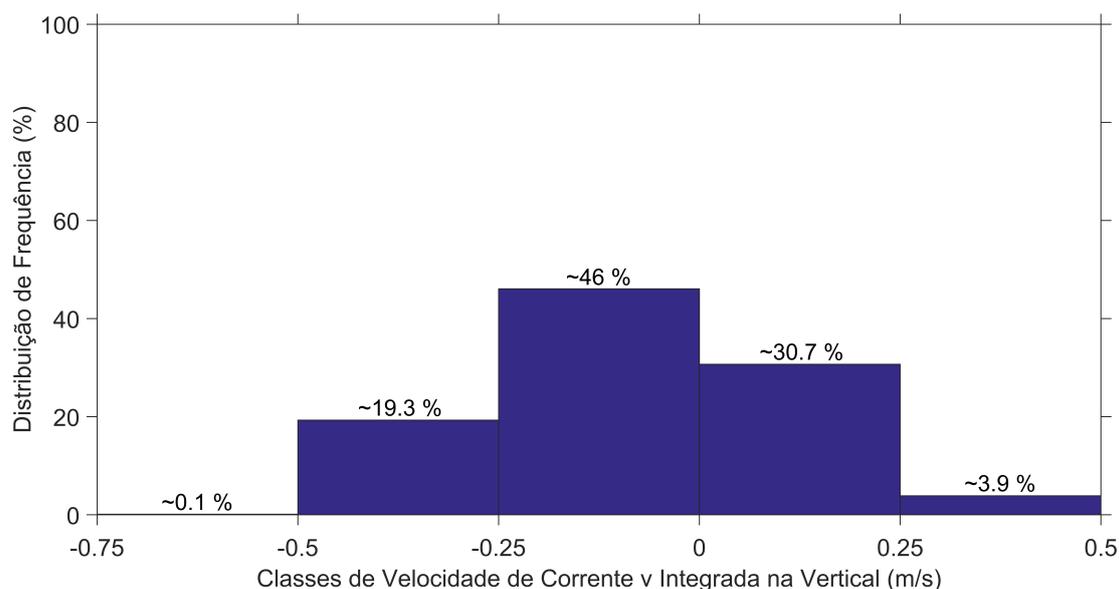


Figura 21: Distribuição de frequência da velocidade do componente  $v$  da corrente (integrado verticalmente) para todo o período de estudo.  $v > 0$  e  $v < 0$  representam movimentos de enchente e de vazante, respectivamente.

830 As intensidades das médias mensais da velocidade de vazante (**Fig. 22**) foram  
831 crescentes no período que abrange os meses de janeiro a setembro, posteriormente  
832 decaindo com a chegada da estação de primavera. As médias mensais da velocidade  
833 de enchente apresentaram um padrão quase que oposto, com valores crescentes até  
834 a estação de outono e decrescentes até o final do inverno, aumentando novamente  
835 durante a primavera. Os picos das velocidades de enchente e de vazante são ob-  
836 servados em maio ( $\sim 0,15 \text{ m.s}^{-1}$ ) e em setembro ( $\sim -0,25 \text{ m.s}^{-1}$ ), respectivamente,  
837 sendo que os mínimos são referentes aos meses de outubro ( $\sim 0,1 \text{ m.s}^{-1}$ ) e fevereiro  
838 ( $\sim -0,15 \text{ m.s}^{-1}$ ), respectivamente.

839 Quanto ao comportamento das anomalias da velocidade do componente  $v$  (**Fig.**  
840 **23**), em grande parte do ano elas são inversas para as direções de enchente e  
841 vazante, somente adquirindo o mesmo sinal durante os meses de junho e julho, este  
842 último sendo o mês em que ambas estiveram mais próximas das respectivas médias  
843 gerais. As máximas anomalias positivas das velocidades de enchente e de vazante

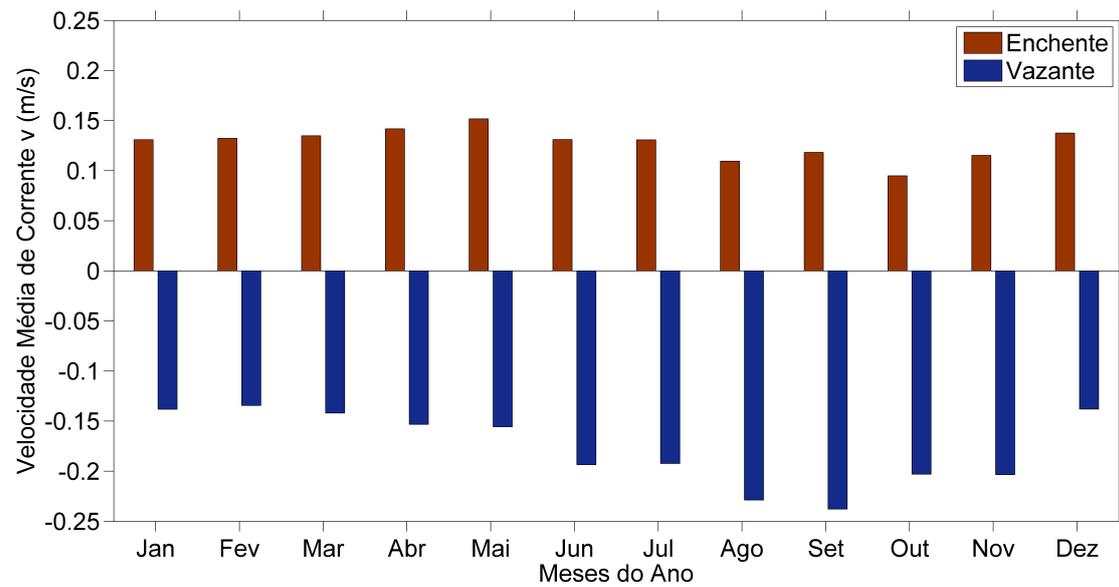


Figura 22: Médias mensais da velocidade do componente  $v$  da corrente (integrado verticalmente) nas direções de enchente e vazante considerando todo o período de estudo.

844 foram observadas nos meses de maio ( $\sim 0,02 \text{ m.s}^{-1}$ ) e de setembro ( $\sim 0,055 \text{ m.s}^{-1}$ ),  
845 respectivamente, enquanto que as máximas anomalias negativas destas direções  
846 foram correspondentes aos meses de outubro ( $\sim -0,035 \text{ m.s}^{-1}$ ) e de fevereiro ( $\sim$   
847  $0,05 \text{ m.s}^{-1}$ ), respectivamente.

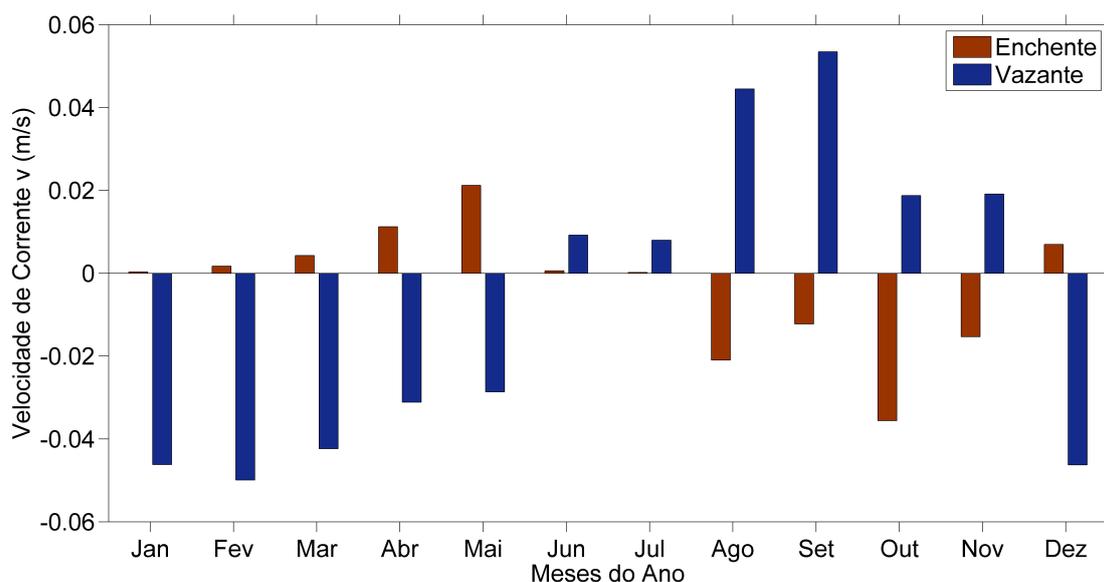


Figura 23: Anomalias mensais da velocidade do componente  $v$  da corrente (integrada verticalmente) nas direções de enchente (média =  $0,13 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) e de vazante (média =  $-0,18 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) considerando todo o período de estudo.

#### 848 4.1.2.4. Salinidade na Superfície e no Fundo

849 As médias anuais de salinidade no fundo da coluna de água (Tab. 7) foram  
 850 maiores do que na superfície com exceção do ano de 2009. Apesar do ano de 2011  
 851 ter apresentado maiores salinidades na superfície do que no fundo em grande parte  
 852 das respectivas séries temporais, a média anual no fundo ( $15,2 \text{ ‰}$ ) foi maior do  
 853 que na superfície ( $14,1 \text{ ‰}$ ). As maiores médias anuais, tanto na superfície, quanto  
 854 no fundo, pertenceram ao ano de 2006, possuindo valores iguais a  $20,3$  e  $23,3 \text{ ‰}$ ,  
 855 respectivamente. Quanto aos desvios padrão, no geral a superfície apresentou os  
 856 maiores valores ao longo dos anos, sendo que, para cada ano, nem sempre esse  
 857 comportamento foi constatado. Os maiores valores de desvio padrão na superfície  
 858 e no fundo foram iguais a  $12,67$  e  $13,76 \text{ ‰}$ , respectivamente, ambos encontrados  
 859 no ano de 2009. Os máximos de salinidade foram alcançados na superfície da  
 860 coluna de água ao invés do fundo em sua maioria, com os valores mais altos

861 sendo iguais a 38,2 e 37,1 ‰, respectivamente, também correspondentes ao ano  
 862 de 2009. Contabilizando todo o período de estudo, os valores médios de salinidade  
 863 na superfície e no fundo foram iguais a 15,1 e 18,7 ‰, respectivamente.

Tabela 7: Médias, desvio padrão e valores máximos dos dados de salinidade na superfície (“Sup.”) e no fundo (“Fun.”) para todo o período de estudo.

	Média		Desvio padrão		Máximo	
	(‰)		(‰)		(‰)	
	Sup.	Fun.	Sup.	Fun.	Sup.	Fun.
2005	10,3	15,7	11,04	11,74	33,0	34,5
2006	20,3	23,3	10,34	8,43	36,4	34,4
2007	12,3	17,7	11,56	11,89	35,5	36,4
2008	15,8	21,0	12,24	11,78	37,3	36,3
2009	17,1	16,0	12,67	13,76	38,2	37,1
2010	8,5	15,2	10,05	11,31	37,6	34,6
2011	14,1	15,2	12,51	9,53	37,7	34,1

Os valores mínimos de salinidade não foram apresentados por serem iguais ou muito próximos a zero.

864 O maior percentual de ocorrências de salinidade na superfície (**Fig. 24**) foi  
 865 correspondente à faixa entre 0 e 5 ‰, representando aproximadamente 32 % do  
 866 total. No fundo, este valor foi igual a ~22 % e referente a faixa de salinidade entre  
 867 25 e 30 ‰. Os valores de salinidade onde as frequências na superfície e no fundo  
 868 foram similares ficaram entre 30-35 ‰ e 35-40 ‰, esta última faixa de salinidade  
 869 apresentando a menor frequência.

870 Analisando as médias mensais de salinidade (**Fig. 25**), no geral os valores fo-  
 871 ram maiores na estação de verão e no início do outono e menores durante o inverno.  
 872 Em média, a coluna de água esteve mais estratificada no mês de novembro e mais

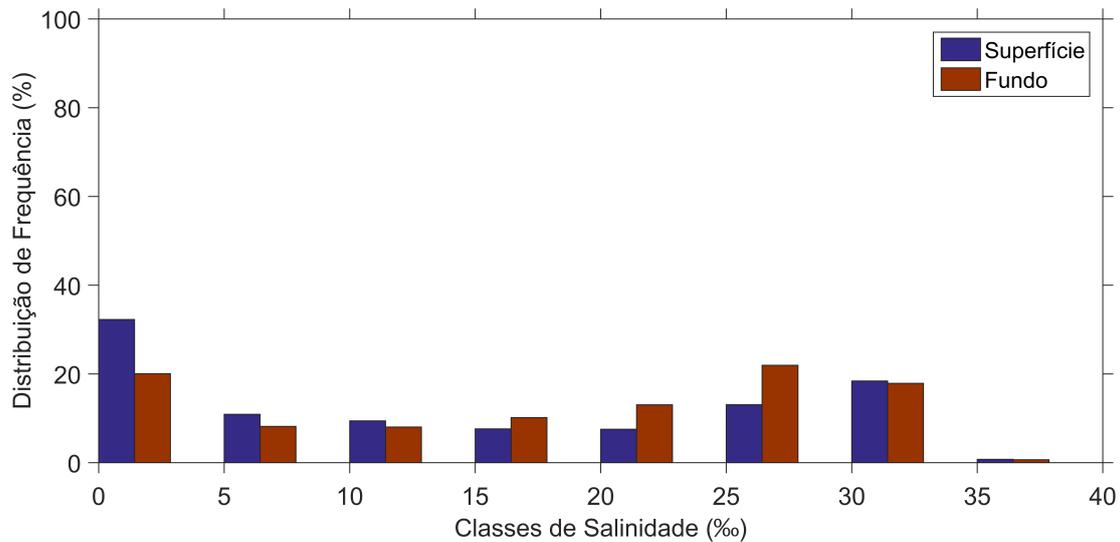


Figura 24: Distribuição de frequência da salinidade na superfície e no fundo para todo o período de estudo.

873 bem misturada em junho, apresentando diferenças de salinidade entre a superfície  
874 e o fundo iguais a 7 ‰ e  $<0,5$  ‰, respectivamente. As maiores médias de salini-  
875 dade na superfície e no fundo foram observadas ambas em fevereiro, com valores  
876 iguais a 24,4 e 28 ‰, respectivamente, enquanto que as menores médias ocorreram  
877 em setembro, obtendo valores correspondentes a 6 e a 10,5 ‰, respectivamente.

878 Os sinais das anomalias dos dados de salinidade (**Fig. 26**) foram os mesmos  
879 tanto para a superfície quanto para o fundo, com exceção do mês de junho onde a  
880 superfície apresentou uma anomalia positiva enquanto que no fundo foi negativa.  
881 No geral, as anomalias foram positivas até o mês de maio e inverteram para ne-  
882 gativas em julho, crescentes até o mês de setembro e posteriormente decaindo em  
883 magnitude, invertendo novamente de sinal em dezembro. As maiores anomalias  
884 positivas na superfície e no fundo ocorreram no mês de fevereiro, apresentando  
885 valores no entorno de 9 e 9,2 ‰, respectivamente. Já as maiores anomalias negati-  
886 vas foram observadas no mês de setembro, com magnitudes próximas a -9,5 ‰ na  
887 superfície e -8,3 ‰ no fundo.

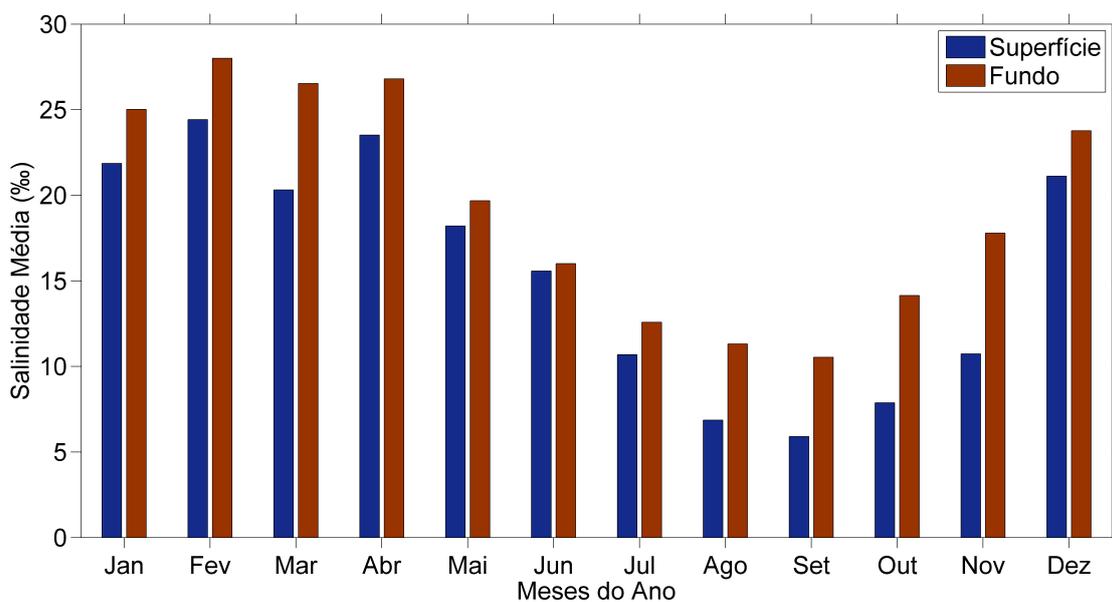


Figura 25: Médias mensais da salinidade na superfície e no fundo para todo o período de estudo.

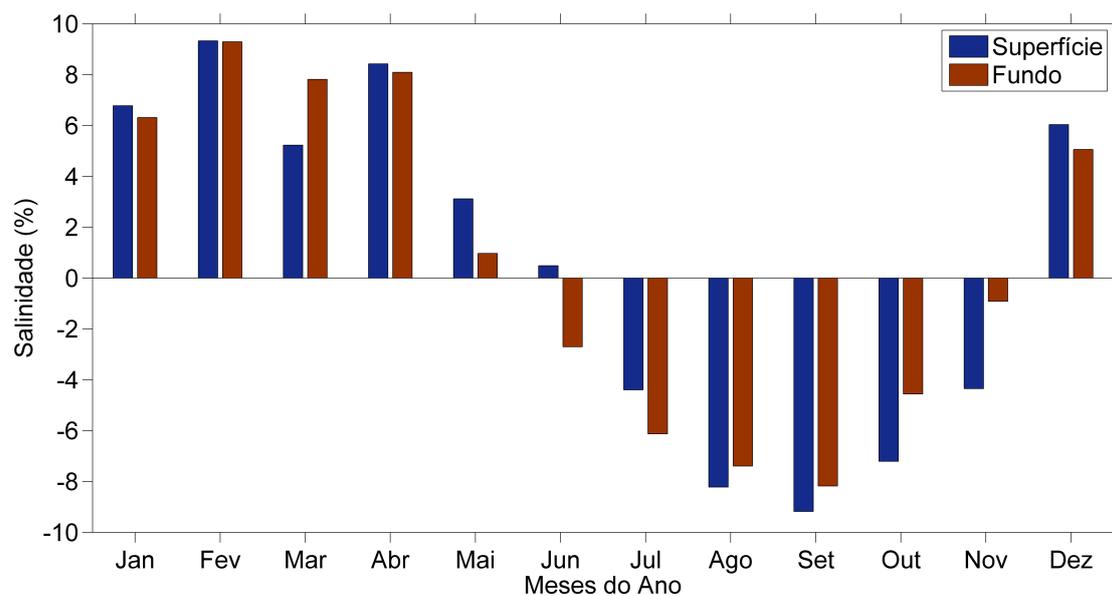


Figura 26: Anomalias mensais da salinidade na superfície (média = 15,1 ‰) e no fundo (média = 18,7 ‰) considerando todo o período de estudo.

888 Através da classificação de estuários segundo PRITCHARD (1989), foi possível  
 889 contabilizar o percentual de tempo em que o estuário foi do tipo bem misturado

ou parcialmente misturado a partir da diferença entre as salinidades na superfície e no fundo ( $\delta S$ ). Em 66,2 % dos casos (**Tab. 8**), o estuário foi classificado como tipo bem misturado, quase o dobro do tempo em que ele permaneceu como tipo parcialmente misturado (33,8 %). As proporções mensais do tipo bem misturado (**Fig. 27**) foram sempre maiores do que 57 % em relação ao tipo parcialmente misturado, com um pico de aproximadamente 76 % no final da estação de outono. Já as frações de tempo em que o estuário foi classificado como tipo parcialmente misturado foram maiores no final da estação de verão e no início da primavera, apresentando um máximo percentual de  $\sim 43$  % em março.

Tabela 8: Fração de tempo em que o estuário foi classificado como tipo bem misturado e parcialmente misturado considerando todo o período de estudo. A separação dos dois tipos foi feita com base na diferença de salinidade entre a superfície e o fundo ( $\delta S$ ) conforme classificação de PRITCHARD (1989).

Tipo de Estuário	Fração de tempo (%)
Bem misturado ( $\delta S < 5$ )	$\sim 66,2$
Parcialmente misturado ( $\delta S \geq 5$ )	$\sim 33,8$

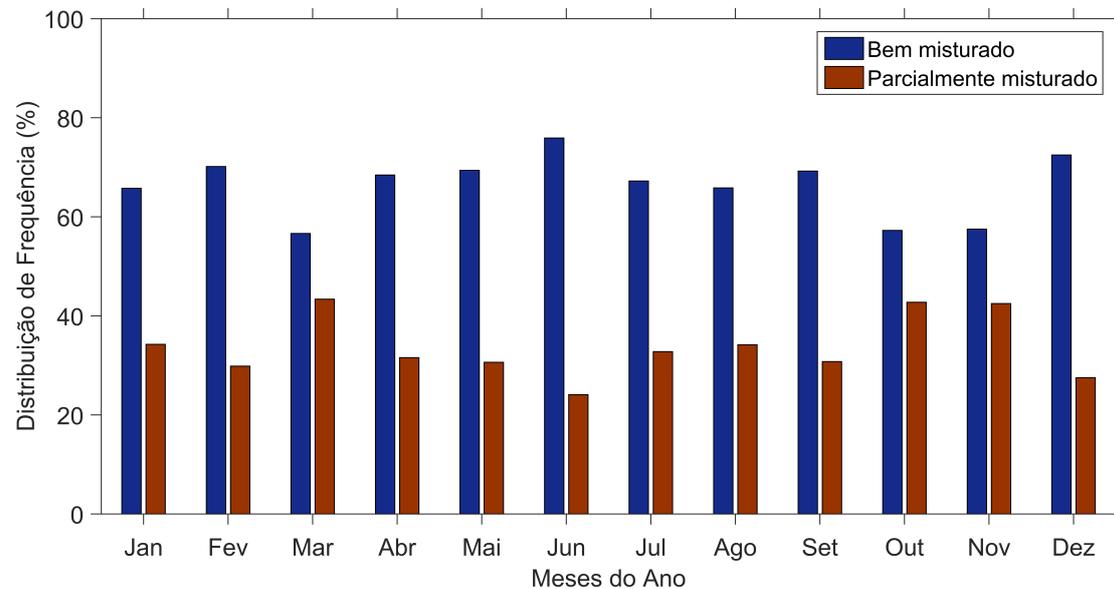


Figura 27: Médias mensais da distribuição de frequência dos tipos de estuário (bem misturado e parcialmente misturado) considerando todo o período de estudo.

## 899 4.2. Descrição dos Ciclos de Enchente-Vazante

### 900 4.2.1. Descarga Fluvial Baixa

#### 901 4.2.1.1. Ciclo de Enchente-Vazante de 25 a 30 de outubro de 2006

902 A média da descarga fluvial total dos rios 20 dias antes do início do ciclo foi de  
 903  $513 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , a menor descarga dentre os ciclos de enchente-vazante descritos neste  
 904 trabalho. O sistema frontal deste período (**Fig. 28a**) inicia-se 18 horas após o  
 905 início de seu respectivo ciclo de enchente-vazante (**Fig. 28b**), terminando 14 horas  
 906 depois. A duração total foi de aproximadamente seis dias e meio. A velocidade  
 907 máxima do vento de SO e de NE atingida nesta frente foi de aproximadamente 10  
 908  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  e  $-13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , respectivamente. O período de ventos de SO durou aproxima-  
 909 damente um dia, com mudança de direção para NE ocorrendo entre os dias 26 e 27  
 910 de outubro. O período de ventos de NE foi relativamente muito maior do que o

911 de SO, durando cinco dias e meio.

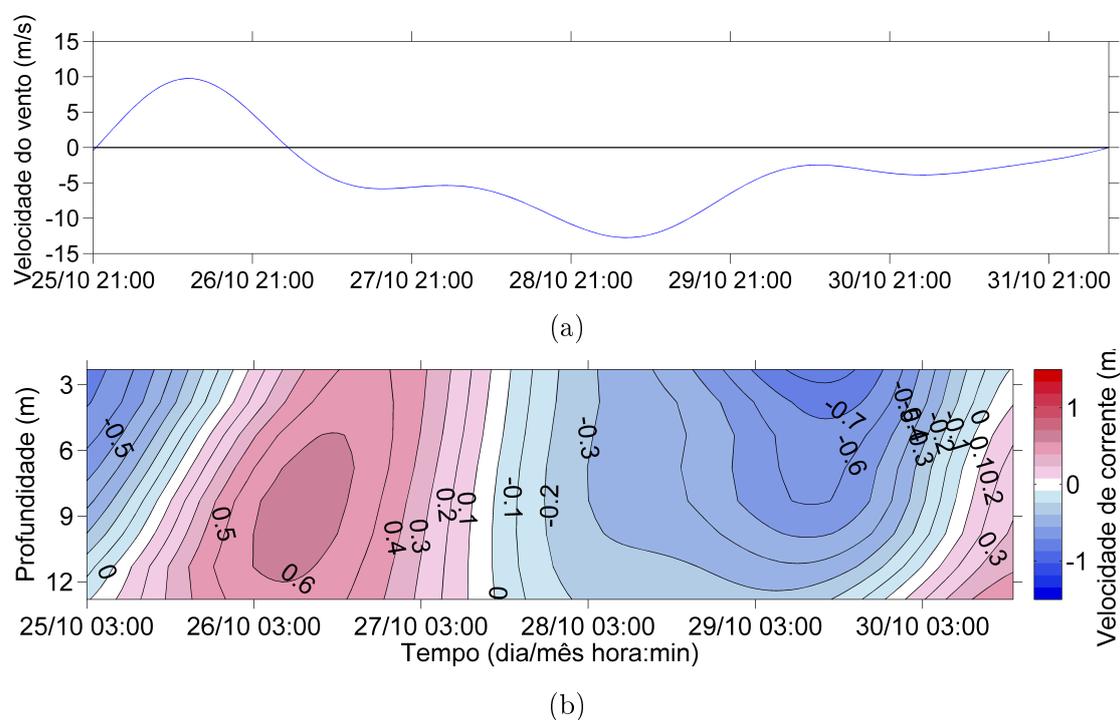


Figura 28: **(a)** Variação temporal da velocidade do vento paralelo à costa resultante da passagem do sistema frontal no período de 25 a 30 de outubro de 2006. Valores positivos e negativos indicam ventos de SO e NE, respectivamente. **(b)** Variação local do componente de velocidade  $v$  forçada pelo sistema frontal. Valores  $v > 0$  e  $v < 0$  indicam movimentos de enchente e vazante, respectivamente.

912 O ciclo de enchente-vazante determinado por esta frente (**Fig. 28b**) abrangeu  
 913 um período menor do que o do sistema frontal —  $\sim 1$  dia a menos —, destacando  
 914 que o regime de vazante ( $\sim 3$  dias) foi um pouco mais longo do que o de enchente  
 915 ( $\sim 2$  dias e meio) apesar da diferença brusca entre os tempos de atuação dos ventos  
 916 de SO e NE. Também apesar desta discrepância, a inversão da direção de corrente  
 917 ocorreu apenas poucas horas ( $\sim 7$  horas) após a inversão de direção do vento.  
 918 Os regimes de enchente e vazante se prolongaram por mais tempo no fundo e  
 919 na superfície, respectivamente, devido ao cisalhamento vertical da velocidade de  
 920 corrente presente tanto no início quanto no fim do ciclo, demonstrando o efeito do

921 componente baroclínico do gradiente de pressão.

922 Os cisalhamentos verticais no início e no fim do ciclo são de ordens similares,  
923 partindo de  $-0,4$  a  $0,3 \text{ m.s}^{-1}$  e de  $-0,3$  a  $0,3 \text{ m.s}^{-1}$ , respectivamente, da superfície  
924 ao fundo. A velocidade máxima de enchente foi de  $0,6 \text{ m.s}^{-1}$ , cobrindo boa parte  
925 da coluna d'água, enquanto que a velocidade máxima de vazante foi de  $-0,8 \text{ m.s}^{-1}$ ,  
926 observada bem próximo da superfície (considerando que parte da coluna de água  
927 não foi amostrada pelo ADP).

928 Na série temporal de velocidade de corrente e salinidade na superfície (**Fig.**  
929 **29**), a salinidade sofre grandes variações que acompanham o comportamento da  
930 velocidade, respondendo às oscilações de velocidade com uma defasagem média de  
931 8 horas depois, sendo este tempo menor em regime de enchente do que em vazante.  
932 Em pouco mais do que um dia, observa-se a salinidade partir de seu valor mínimo  
933 encontrado no ciclo ( $0 \text{ ‰}$ ) e alcançar seu valor máximo ( $\sim 35 \text{ ‰}$ ), que condiz  
934 com o pico de velocidade de enchente. A partir deste ponto, a salinidade sofre  
935 gradual decréscimo que acompanha o enfraquecimento da velocidade de enchente,  
936 chegando a  $10 \text{ ‰}$  3 dias depois em conjunto com o pico de velocidade de vazante  
937 ( $\sim -0,75 \text{ m.s}^{-1}$ ). Ao final do ciclo, a salinidade volta a aumentar à medida que  
938 ocorre diminuição da velocidade de corrente, finalizando em aproximadamente 19  
939  $\text{‰}$ .

940 Também se observa esta rápida variação de salinidade na série temporal de  
941 velocidade e salinidade no fundo (**Fig. 30**), onde a salinidade parte de seu valor  
942 mínimo dentro do ciclo ( $\sim 6 \text{ ‰}$ ) para o seu valor máximo ( $\sim 34 \text{ ‰}$ ) em um  
943 dia. O pico de salinidade ocorre próximo do pico de velocidade de enchente, com  
944 uma defasagem de poucas horas antes. A salinidade se mantém alta em torno  
945 dos  $30 \text{ ‰}$  em grande parte do ciclo, e somente passa a diminuir dois dias após  
946 a velocidade de enchente começar a perder intensidade. Ao final do ciclo, os  
947 valores de salinidade diminuem para  $\sim 15 \text{ ‰}$  e voltam a subir acompanhando o

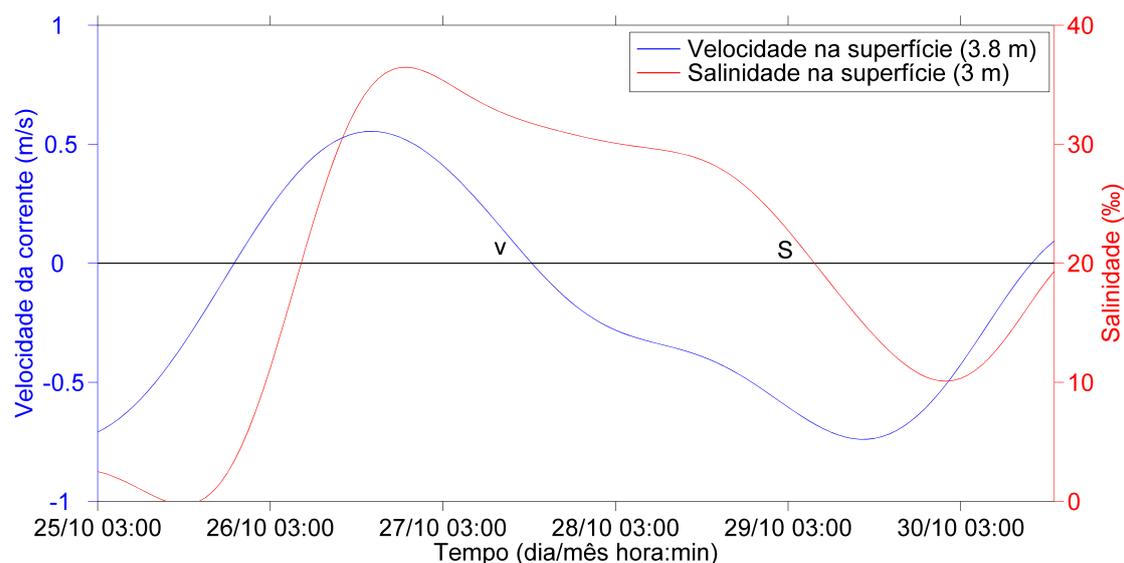


Figura 29: Série temporal do componente de velocidade  $v$  (azul) e de salinidade (vermelho) na superfície da coluna d'água durante o ciclo de enchente-vazante que cobriu o período entre 25 a 30 de outubro de 2006. Valores  $v > 0$  e  $v < 0$  indicam movimentos de enchente e vazante, respectivamente.

948 fortalecimento da velocidade de enchente, finalizando com aproximadamente 16  
 949 ‰ e a velocidade de corrente com  $\sim 0,45 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

950 O perfil médio do componente de velocidade  $v$  (**Fig. 31**) é caracterizado por  
 951 ser bidirecional, com direção estuário abaixo da superfície até 9,8 m de profun-  
 952 didade e direção de enchente a partir deste ponto até o fundo. As intensidades  
 953 das velocidades em geral são baixas em consequência da descarga fluvial pouco  
 954 intensa, com velocidade máxima de  $-0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  observada na superfície. A máxima  
 955 velocidade de enchente é encontrada bem próxima ao fundo, com uma magnitude  
 956 de  $\sim 0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Quanto aos desvios padrão, o menor é encontrado no fundo com  
 957 um valor próximo de  $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , enquanto que o maior está presente na superfície  
 958 ( $0,43 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Em média, o desvio padrão deste perfil é consideravelmente alto,  
 959 com um valor de  $0,38 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

960 De acordo com o Diagrama Estratificação-circulação de HANSEN & RAT-

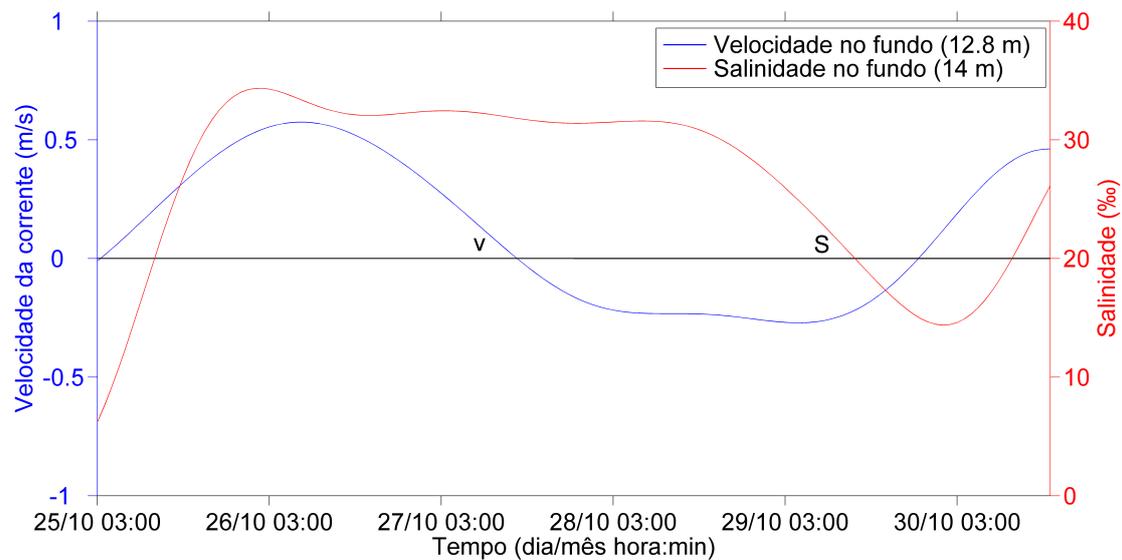


Figura 30: Série temporal do componente de velocidade  $v$  (azul) e de salinidade (vermelho) no fundo da coluna d'água durante o ciclo de enchente-vazante que cobriu o período entre 25 a 30 de outubro de 2006. Valores  $v > 0$  e  $v < 0$  indicam movimentos de enchente e vazante, respectivamente.

961 TRAY (1966) deste ciclo de enchente-vazante (**Fig. 32**), ele pode ser classificado  
962 como estuário do tipo 2b (parcialmente misturado e com alta estratificação verti-  
963 cal), em conformidade com o perfil médio bidirecional do componente  $v$ . Entre-  
964 tanto, analisando a diferença entre a salinidade no fundo e na superfície ( $\delta S$ ) de  
965 6,2 ‰, este ciclo seria melhor classificado como tipo 2a (parcialmente misturado  
966 e fracamente estratificado).

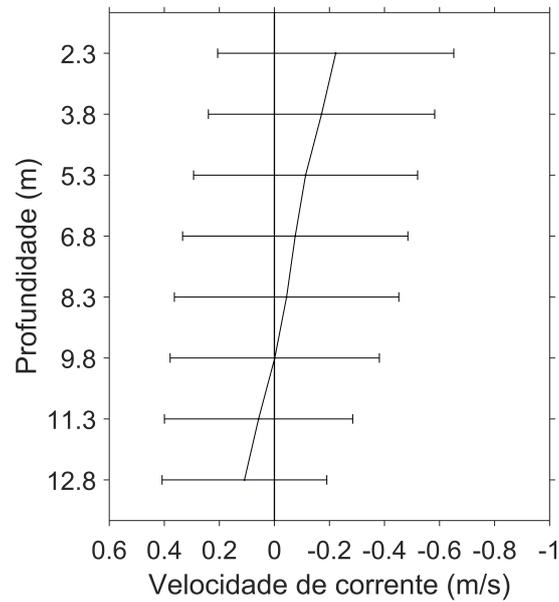


Figura 31: Perfil vertical médio do componente de velocidade  $v$  correspondente ao ciclo de enchente-vazante de 25 a 30 de outubro de 2006. As barras horizontais representam o desvio padrão de velocidade por profundidade. Valores  $v > 0$  e  $v < 0$  indicam movimentos de enchente e vazante, respectivamente.

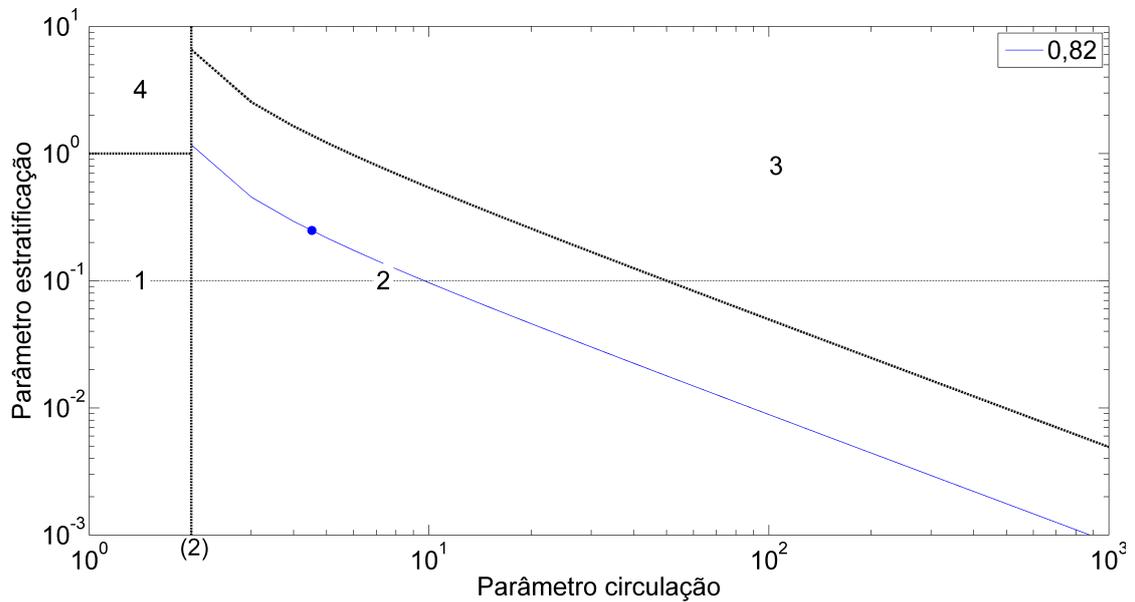


Figura 32: Diagrama Estratificação-circulação segundo HANSEN & RATTRAY (1966) correspondente ao ciclo de enchente-vazante de 25 a 30 de outubro de 2006. O parâmetro circulação no eixo das abscissas é definido como  $v_s/v_f$  e o parâmetro estratificação no eixo das ordenadas é definido como  $\delta S/\bar{s}$ . Em azul: curva paramétrica do número adimensional  $\nu$ .

#### 967 4.2.1.2. Ciclo de Enchente-Vazante de 7 a 12 de janeiro de 2009

968 Este ciclo apresentou uma descarga fluvial considerada muito baixa ( $599 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )  
969 quando comparada com a descarga média anual de  $2.400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  para a Lagoa dos  
970 Patos. O sistema frontal correspondente a este intervalo de tempo (**Fig. 33a**)  
971 começa 14 horas após o início de seu respectivo ciclo de enchente-vazante (**Fig.**  
972 **33b**), porém terminando 17 horas antes. A duração total da frente foi de apro-  
973 ximadamente três dias e meio, sendo que o período de atuação dos ventos de SO  
974 (pouco menos do que um dia) foi menor do que o de ventos de NE (dois dias e  
975 meio). Há também uma grande discrepância entre as velocidades máximas dos  
976 ventos, com intensidades de  $\sim 2,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  para os ventos de SO e de  $\sim 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  para  
977 os ventos de NE. A troca de direção de SO para NE ocorreu no final do dia 8 de  
978 janeiro.

979 O ciclo de enchente-vazante forçado por este sistema frontal (**Fig. 33b**) cobriu  
980 um intervalo de tempo de quase 5 dias, maior do que o período do respectivo  
981 sistema frontal (um dia e meio maior). As abrangências temporais dos regimes de  
982 enchente e vazante foram um pouco mais simétricas do que dos ventos de SO e NE,  
983 com períodos de dois dias e três dias, respectivamente. Quanto às magnitudes das  
984 velocidades, a velocidade máxima de enchente foi de  $0,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  para toda a coluna  
985 d'água, enquanto que a máxima de vazante foi de  $-0,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  apenas observada  
986 na superfície. A troca do regime de enchente para o de vazante ocorreu no dia  
987 9 de janeiro, 17 horas após a troca de direção dos ventos, em concordância com  
988 a diferença temporal entre término da frente e do ciclo. É possível observar um  
989 cisalhamento vertical da corrente que vai da superfície ao fundo tanto no início  
990 quanto no fim do ciclo, com variações de velocidade de 0,2 unidades ( $-0,1 - 0,1$   
991  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) e de 0,4 unidades ( $-0,2 - 0,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) respectivamente, atribuídos à influência  
992 do componente baroclínico da força do gradiente de pressão.

993 Analisando a salinidade na superfície deste ciclo (**Fig. 34**), seu valor inicial é

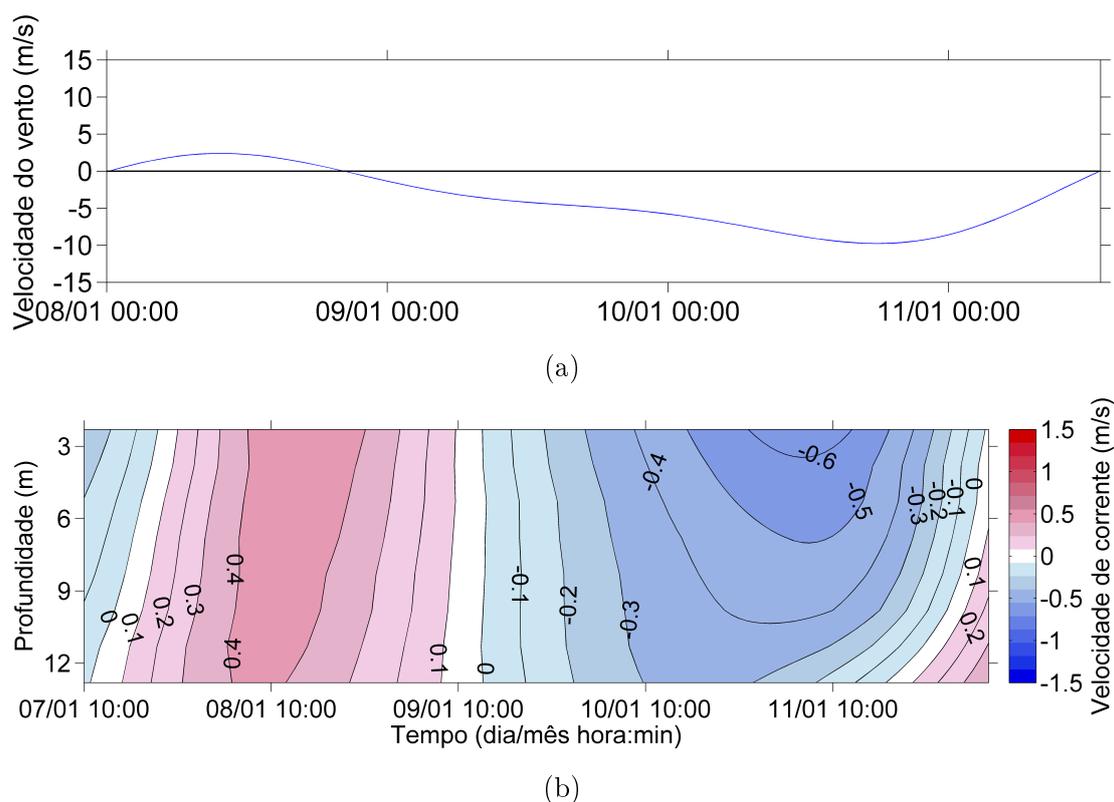


Figura 33: **(a)** Variação temporal da velocidade do vento paralelo à costa resultante da passagem do sistema frontal no período de 7 a 12 de janeiro de 2009. Valores positivos e negativos indicam ventos de SO e NE, respectivamente. **(b)** Variação local do componente de velocidade  $v$  forçada pelo sistema frontal. Valores  $v > 0$  e  $v < 0$  indicam movimentos de enchente e vazante, respectivamente.

994 de 30 ‰, sofrendo uma pequena diminuição e posterior aumento que acompanha  
 995 a intensificação da velocidade em regime de enchente. O máximo de salinidade  
 996 durante o ciclo é atingido aproximadamente 4 horas depois do pico de velocidade de  
 997 enchente na superfície, com um valor de  $\sim 35$  ‰ que é mantido mesmo com a perda  
 998 de intensidade da velocidade. A salinidade somente passa a diminuir um dia e meio  
 999 após o enfraquecimento da velocidade de enchente, chegando em seu valor mínimo  
 1000 de  $\sim 18,5$  ‰ no entorno de 15 horas depois do pico de velocidade de vazante.  
 1001 Próximo do final do ciclo, ocorre um pequeno aumento de salinidade associado à  
 1002 diminuição da velocidade de corrente, finalizando em aproximadamente 22,5 ‰.

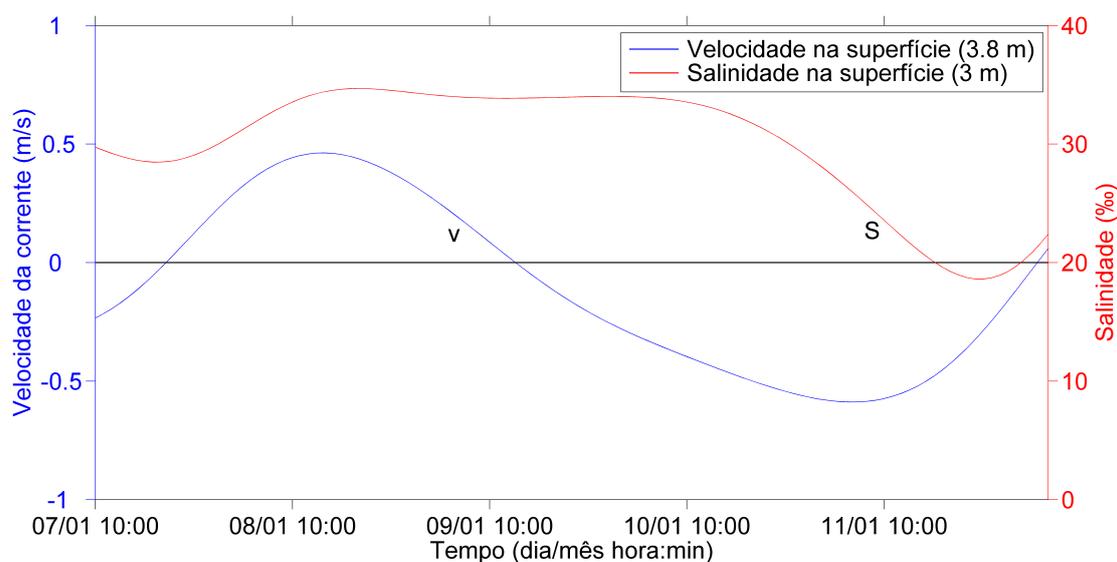


Figura 34: Série temporal do componente de velocidade  $v$  (azul) e de salinidade (vermelho) na superfície da coluna d'água durante o ciclo de enchente-vazante que cobriu o período entre 7 a 12 de janeiro de 2009. Valores  $v > 0$  e  $v < 0$  indicam movimentos de enchente e vazante, respectivamente.

1003 O comportamento da salinidade no fundo (**Fig. 35**) reproduziu as mesmas  
 1004 variações da salinidade na superfície, com pequenas diferenças em seus valores.  
 1005 Como o pico de velocidade de enchente foi um pouco menor e ocorreu antes no  
 1006 fundo do que na superfície da coluna d'água, a salinidade máxima no fundo ( $\sim 34.5$   
 1007 ‰) também foi um pouco menor e foi atingida antes do que na superfície, man-  
 1008 tendo a mesma defasagem de 4 horas. Seguindo a mesma analogia, como o pico de  
 1009 velocidade de vazante no fundo foi menor do que na superfície, conseqüentemente o  
 1010 mínimo de salinidade no fundo ( $\sim 22,5$  ‰) foi mais alto do que na superfície, com  
 1011 a diferença de que a defasagem entre velocidade e salinidade foi aproximadamente  
 1012 10 horas maior. Ao final do ciclo, como a velocidade no fundo entrou em regime  
 1013 de enchente, a salinidade sofreu um aumento e finalizou em pouco mais do que 27  
 1014 ‰, concomitante com uma velocidade de  $\sim 0,4 \text{ m.s}^{-1}$ .

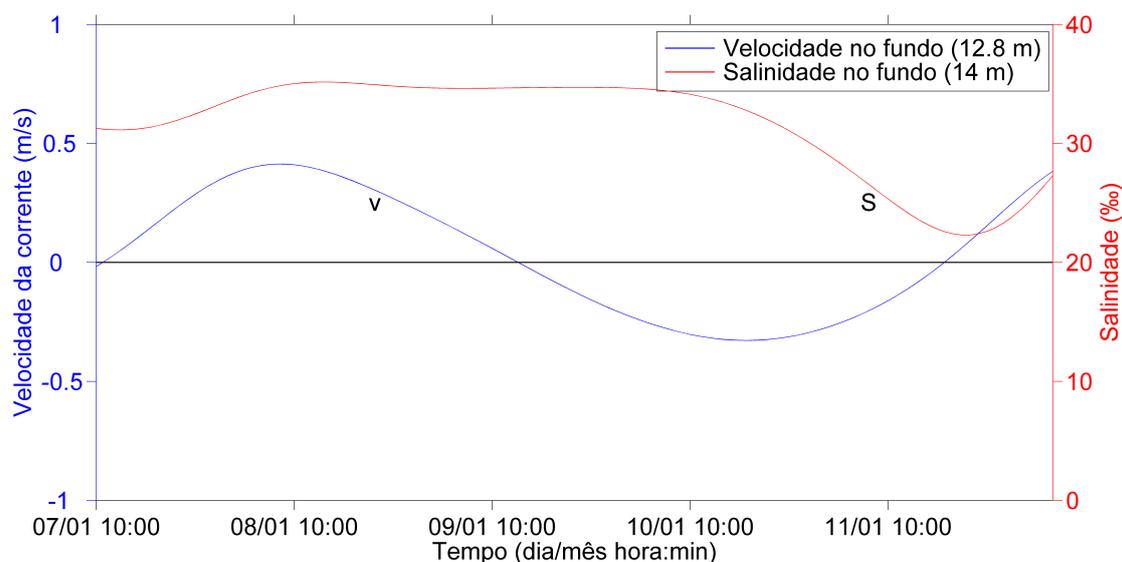


Figura 35: Série temporal do componente de velocidade  $v$  (azul) e de salinidade (vermelho) no fundo da coluna d'água durante o ciclo de enchente-vazante que cobriu o período entre 7 a 12 de janeiro de 2009. Valores  $v > 0$  e  $v < 0$  indicam movimentos de enchente e vazante, respectivamente.

1015 O perfil médio do componente de velocidade  $v$  (**Fig. 36**) é basicamente domi-  
 1016 nado por velocidades em regime de vazante apesar da baixa descarga fluvial, com  
 1017 troca de direção para enchente em 11,3 m de profundidade. As velocidades são  
 1018 bastante baixas, com um máximo de aproximadamente  $-0,13 \text{ m.s}^{-1}$  localizado na  
 1019 superfície e um máximo de velocidade de enchente de  $\sim 0,05 \text{ m.s}^{-1}$  no fundo. Em  
 1020 relação aos desvios padrão, o maior valor observado foi de  $0,37 \text{ m.s}^{-1}$  na superfície  
 1021 e o menor foi de  $0,25 \text{ m.s}^{-1}$  no fundo. No geral, os desvios padrão foram altos,  
 1022 tendo em média um valor de  $0,31 \text{ m.s}^{-1}$ .

1023 O parâmetro  $\nu = 0,99$  calculado no Diagrama Estratificação-circulação (**Fig.**  
 1024 **37**) indica que neste ciclo a classificação do estuário está na transição entre um  
 1025 estuário parcialmente misturado com fraca estratificação vertical (tipo 2a) e um  
 1026 estuário bem misturado (tipo 1). Entretanto, como o perfil vertical médio do  
 1027 componente de velocidade (**Fig. 36**) apresenta movimentos de enchente com fraca

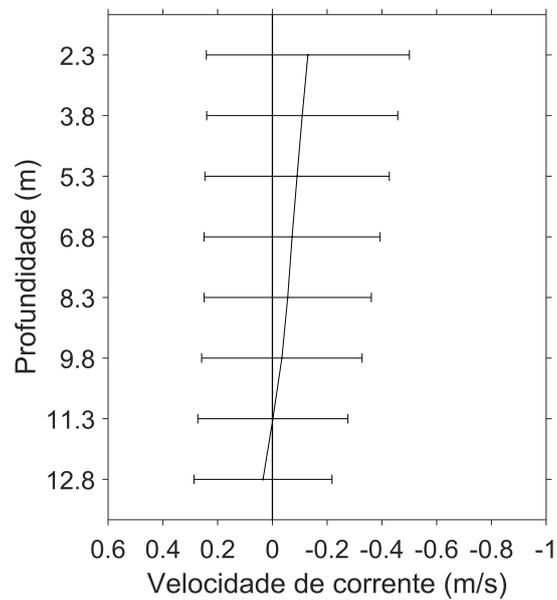


Figura 36: Perfil vertical médio do componente de velocidade  $v$  correspondente ao ciclo de enchente-vazante de 7 a 12 de janeiro de 2009. As barras horizontais representam o desvio padrão de velocidade por profundidade. Valores  $v > 0$  e  $v < 0$  indicam movimentos de enchente e vazante, respectivamente.

1028 intensidade apenas nas proximidades do fundo, o estuário pode ser classificado  
1029 como tipo 1. Para reforçar este ponto, o  $\delta S$  deste perfil é de apenas 1,6 ‰, sendo  
1030 classificado como tipo bem misturado de acordo com PRITCHARD (1989).

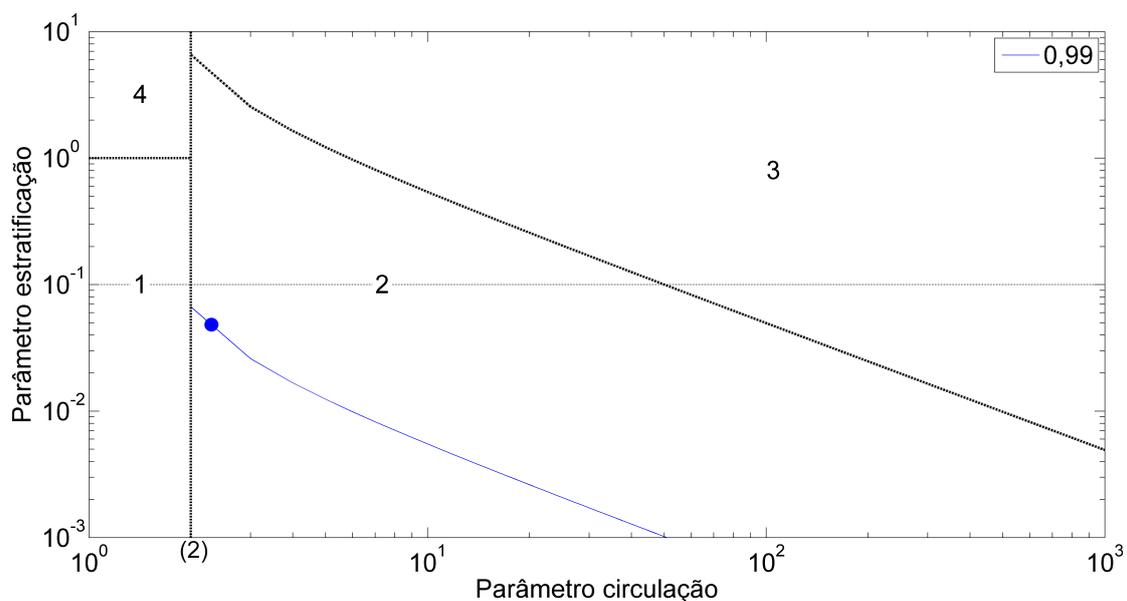


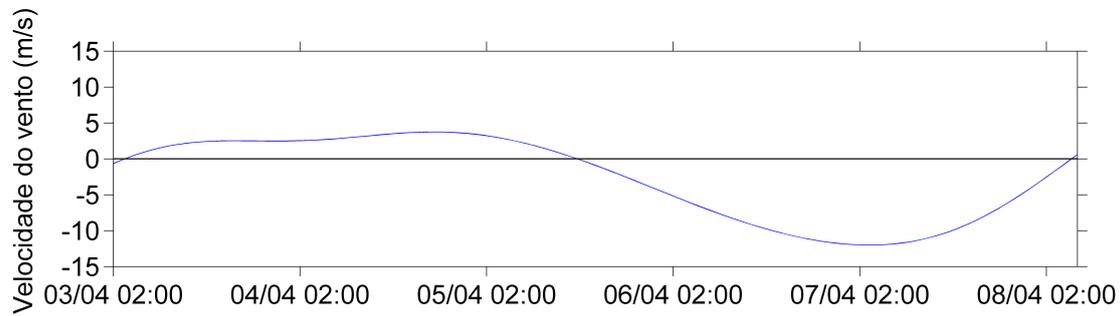
Figura 37: Diagrama Estratificação-circulação segundo HANSEN & RATTRAY (1966) correspondente ao ciclo de enchente-vazante de 7 a 12 de janeiro de 2009. O parâmetro circulação no eixo das abscissas é definido como  $v_s/v_f$  e o parâmetro estratificação no eixo das ordenadas é definido como  $\delta S/\bar{s}$ . Em azul: curva paramétrica do número adimensional  $\nu$ .

## 1031 4.2.2. Descarga Fluvial Média

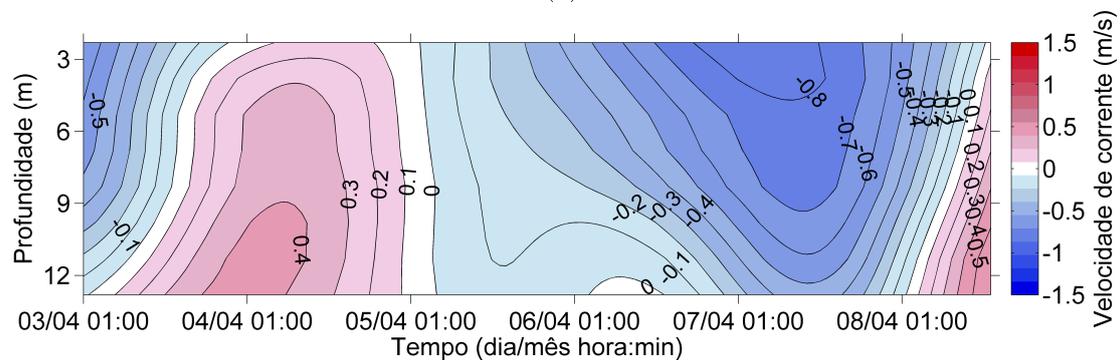
### 1032 4.2.2.1. Ciclo de Enchente-Vazante de 3 a 8 de abril de 2007

1033 A descarga fluvial média deste ciclo foi de  $1.894 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , um valor considerado  
 1034 intermediário para a Lagoa dos Patos. A frente meteorológica que atuou neste  
 1035 período (**Fig. 38a**) inicia-se apenas 1 hora após o começo do ciclo de enchente-  
 1036 vazante resultante (**Fig. 38b**), porém terminando 8 horas antes. A duração total  
 1037 do sistema frontal foi de pouco mais do que cinco dias, apresentando uma simetria  
 1038 entre os intervalos de tempo de atuação dos ventos de SO e NE, que foi de dois  
 1039 dias e meio para ambos. Entretanto, há uma discrepância entre as velocidades  
 1040 máximas dos ventos, que foi de  $\sim 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  para os ventos de SO e de  $\sim 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$   
 1041 para os ventos de NE. A troca de direção de SO para NE ocorreu entre os dias 5

1042 e 6 de abril.



(a)



(b)

Figura 38: **(a)** Variação temporal da velocidade do vento paralelo à costa resultante da passagem do sistema frontal no período de 3 a 8 de abril de 2007. Valores positivos e negativos indicam ventos de SO e NE, respectivamente. **(b)** Variação local do componente de velocidade  $v$  forçada pelo sistema frontal. Valores  $v > 0$  e  $v < 0$  indicam movimentos de enchente e vazante, respectivamente.

1043 O ciclo de enchente-vazante correspondente à passagem da frente (**Fig. 38b**)  
 1044 abrangeu um período de tempo um pouco maior do que o do sistema frontal,  
 1045 cobrindo quase 5 dias e meio. Apesar da simetria do tempo de atuação dos ventos  
 1046 de NE e SO, a abrangência temporal do regime de vazante foi maior do que a  
 1047 de enchente, com períodos de três dias e meio e dois dias, respectivamente. As  
 1048 velocidades máximas de enchente e de vazante concordaram com as magnitudes  
 1049 dos ventos de SO e NE, respectivamente, visto que as velocidades máximas dentro  
 1050 dos regimes de vazante e de enchente foram de  $-0,8 \text{ m.s}^{-1}$  na superfície e  $0,4 \text{ m.s}^{-1}$

no fundo, respectivamente. É importante ressaltar que velocidades mais altas de enchente foram observadas fora de seu respectivo regime, com intensidade máxima de  $0,5 \text{ m.s}^{-1}$  encontrada ao final do ciclo no fundo da coluna d'água. A troca do regime de enchente para o de vazante ocorreu durante o dia 5 de abril, 9 horas antes da mudança de direção dos ventos. Provavelmente devido à fraca intensidade do vento de SO, baixas velocidades de corrente ( $\leq -0,1 \text{ m.s}^{-1}$ ) se estendem até dois dias após o período de estofa de vazante, inclusive atingindo zero de velocidade no fundo entre os dias 6 e 7 de abril. Após este intervalo e com a entrada de ventos de NE, um forte cisalhamento vertical de velocidade entra em ação. Tanto no início quanto no fim do ciclo também se observa um intenso cisalhamento vertical da corrente, possuindo a mesma variação de velocidade que vai de  $-0,3$  a  $0,3 \text{ m.s}^{-1}$  da superfície ao fundo, atribuído à influência do componente baroclínico da força do gradiente de pressão.

O valor inicial da salinidade na superfície durante este ciclo (**Fig. 39**) é bastante baixo ( $\sim 5,5 \text{ ‰}$ ), em conformidade com a intensa velocidade na direção de vazante. À medida que ocorre o enfraquecimento da velocidade de vazante e posterior intensificação da velocidade de enchente, a salinidade aumenta até atingir o seu valor máximo de  $\sim 27,5 \text{ ‰}$ , aproximadamente 18 horas depois do pico de velocidade de enchente. A salinidade passa a diminuir bruscamente em conjunto com a intensificação da velocidade de vazante, chegando ao valor mínimo de  $\sim 2 \text{ ‰}$  20 horas após o pico de velocidade de vazante. Observa-se um pequeno aumento de salinidade ao final do ciclo à medida que a velocidade perde intensidade, finalizando com aproximadamente  $9 \text{ ‰}$ .

O comportamento da salinidade no fundo (**Fig. 40**) é muito diferente do observado na superfície, iniciando com um valor de salinidade o dobro do observado na figura anterior ( $10 \text{ ‰}$ ) porque a velocidade já começa em regime de enchente. Ocorre um aumento brusco de salinidade dentro do intervalo de um dia com um

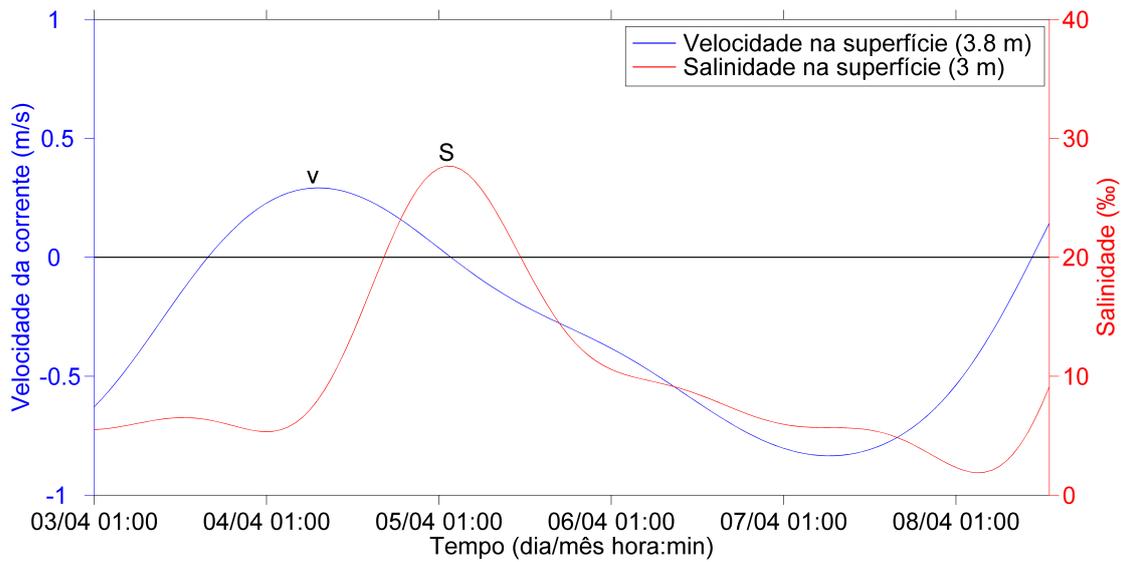


Figura 39: Série temporal do componente de velocidade  $v$  (azul) e de salinidade (vermelho) na superfície da coluna d'água durante o ciclo de enchente-vazante que cobriu o período entre 3 a 8 de abril de 2007. Valores  $v > 0$  e  $v < 0$  indicam movimentos de enchente e vazante, respectivamente.

1078 pico em  $\sim 34,5$  ‰, respondendo mais rapidamente às variações de velocidade do  
 1079 que na superfície, visto que o pico de salinidade é observado apenas  $\sim 3$  horas  
 1080 depois do pico de velocidade de enchente. Devido à desaceleração da velocidade  
 1081 (valores próximos a zero), a salinidade sofre uma leve diminuição, porém mantendo-  
 1082 se acima de  $30$  ‰ por aproximadamente dois dias e meio e somente decrescendo  
 1083 quando a velocidade de vazante ganha intensidade. O valor mínimo de salinidade  
 1084 durante o ciclo foi de  $\sim 2,5$  ‰ 4 horas após o pico de velocidade de vazante,  
 1085 com posterior aumento drástico causado pela troca de direção de velocidade. A  
 1086 salinidade atinge o valor de  $30$  ‰ ao final do ciclo ao mesmo tempo que a velocidade  
 1087 máxima de enchente ( $\sim 0,6$  m.s<sup>-1</sup>) é alcançada.

1088 Grande parte da coluna d'água é caracterizada por velocidades de vazante  
 1089 no perfil médio do componente de velocidade  $v$  (**Fig. 41**), estendendo-se da  
 1090 superfície até a troca de direção para enchente em  $11,3$  m de profundidade. Em

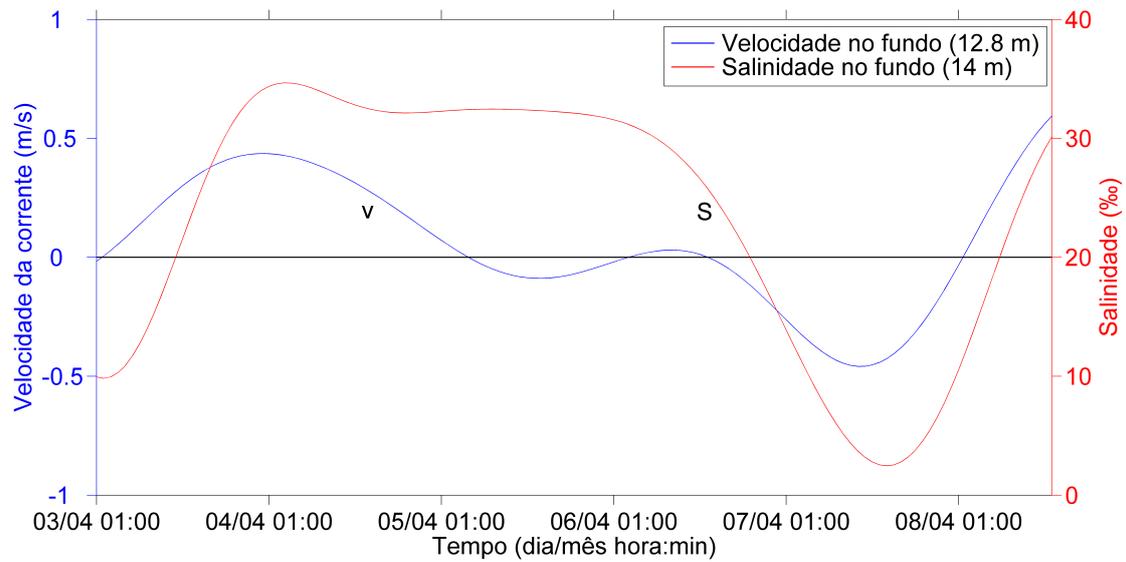


Figura 40: Série temporal do componente de velocidade  $v$  (azul) e de salinidade (vermelho) no fundo da coluna d'água durante o ciclo de enchente-vazante que cobriu o período entre 3 a 8 de abril de 2007. Valores  $v > 0$  e  $v < 0$  indicam movimentos de enchente e vazante, respectivamente.

1091 geral, as velocidades são intermediárias de acordo com a descarga fluvial, com um  
 1092 valor máximo de  $\sim -0,36 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  na superfície e máxima velocidade de enchente de  
 1093 aproximadamente  $0,05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  no fundo. O maior valor de desvio padrão é de  $0,37$   
 1094  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  em 3,8 m de profundidade, enquanto que o menor foi de  $0,27 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  bem  
 1095 próximo do fundo. Em média, o valor de desvio padrão foi de  $0,33 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

1096 Segundo o Diagrama Estratificação-circulação deste ciclo (**Fig. 42**), ele se en-  
 1097 contra no limite entre tipo 1 (bem misturado) e tipo 2b (parcialmente misturado e  
 1098 com alta estratificação vertical). Visto que o perfil médio de velocidade é bidireci-  
 1099 onal apenas próximo ao fundo, a classificação deste ciclo condiz mais com os tipos  
 1100 1 ou 2a (parcialmente misturado e com fraca estratificação vertical); entretanto,  
 1101 seu alto valor de  $\delta S$  ( $18,4 \text{ ‰}$ ) culmina para o tipo 2b, em conformidade com a  
 1102 classificação segundo o Diagrama Estratificação-circulação.

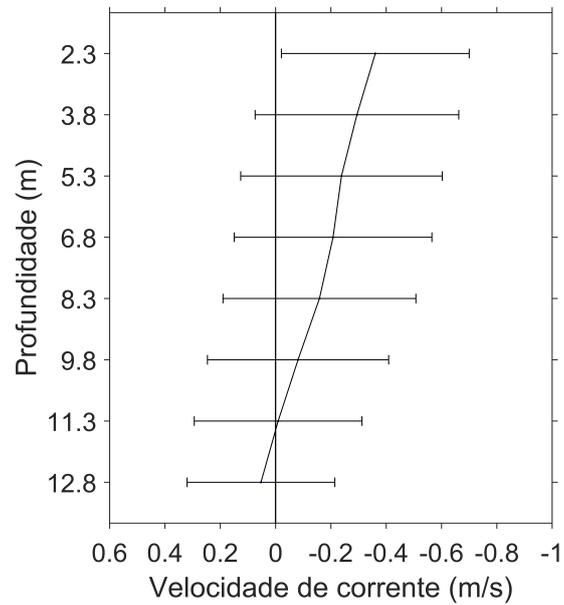


Figura 41: Perfil vertical médio do componente de velocidade  $v$  correspondente ao ciclo de enchente-vazante de 3 a 8 de abril de 2007. As barras horizontais representam o desvio padrão de velocidade por profundidade. Valores  $v > 0$  e  $v < 0$  indicam movimentos de enchente e vazante, respectivamente.

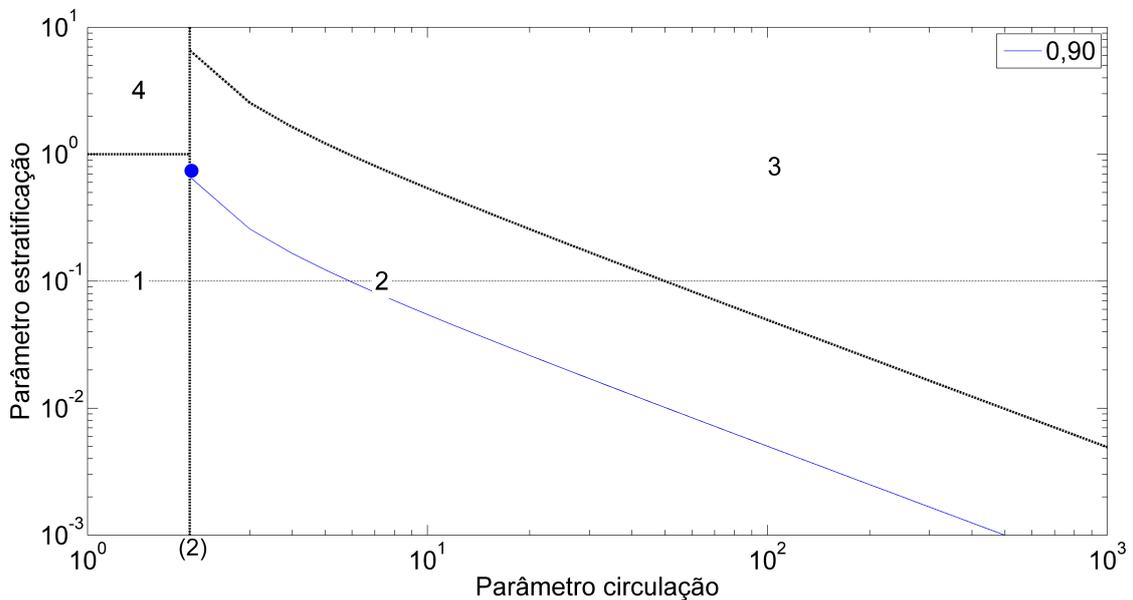
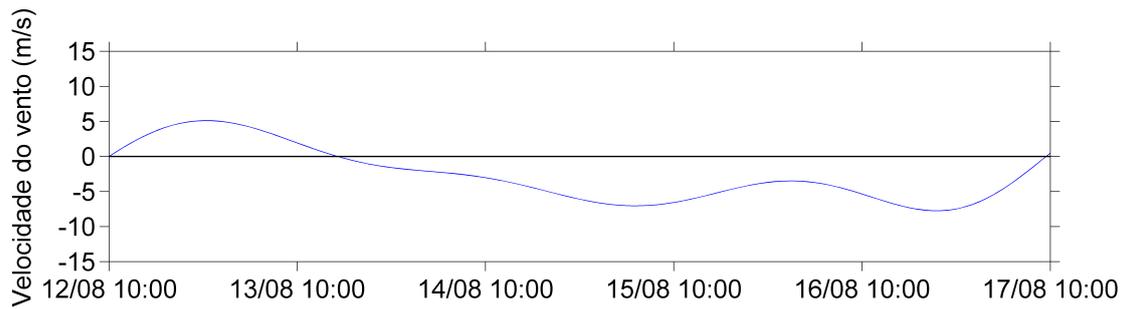


Figura 42: Diagrama Estratificação-circulação segundo HANSEN & RATTRAY (1966) correspondente ao ciclo de enchente-vazante de 3 a 8 de abril de 2007. O parâmetro circulação no eixo das abscissas é definido como  $v_s/v_f$  e o parâmetro estratificação no eixo das ordenadas é definido como  $\delta S/\bar{s}$ . Em azul: curva paramétrica do número adimensional  $\nu$ .

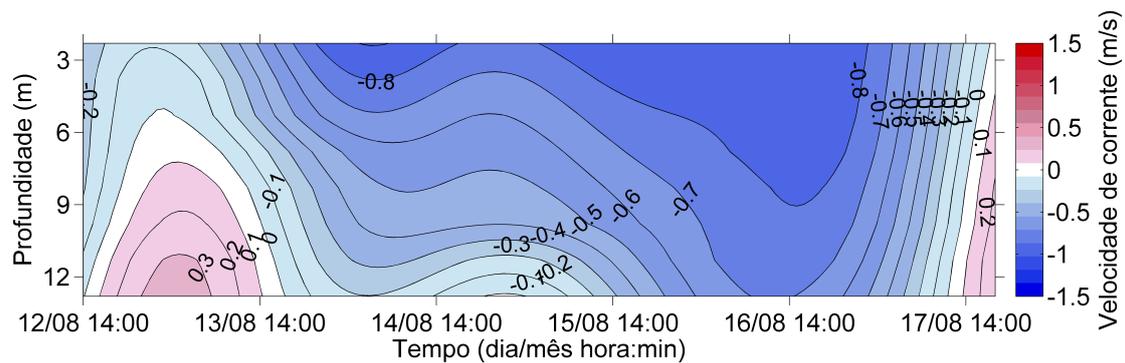
#### 1103 4.2.2.2. Ciclo de Enchente-Vazante de 12 a 17 de agosto de 2008

1104 Este ciclo apresentou um valor intermediário de descarga fluvial média, com  
1105 intensidade de  $1.779 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . O sistema frontal atuante (**Fig. 43a**) iniciou 4 horas  
1106 antes do começo do seu respectivo ciclo de enchente-vazante (**Fig. 43b**), termi-  
1107 nando 8 horas antes. A duração total da frente foi de exatamente cinco dias, com  
1108 marcada discrepância entre os períodos de atuação dos ventos de SO (pouco mais  
1109 do que um dia) e NE (quase quatro dias). Entretanto, as velocidades dos ventos  
1110 foram similares, com um valor máximo de  $\sim 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  para os ventos de SO e de  $\sim$   
1111  $7,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  para os ventos de NE. Os ventos de NE apresentam um comportamento  
1112 oscilatório ao redor de  $-5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , sofrendo uma pequena diminuição de velocidade  
1113 (para  $\sim -3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) entre os dois picos de  $\sim -7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  e de  $\sim -7,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . A troca de  
1114 direção de SO para NE ocorreu dentro do dia 13 de agosto.

1115 O ciclo de enchente-vazante resultante do sistema frontal (**Fig. 43b**) teve  
1116 uma duração total semelhante, cobrindo pouco mais do que 5 dias. Apesar da  
1117 simetria nas intensidades dos ventos de NE e SO, o vento de SO não foi forte o  
1118 suficiente para competir com a descarga fluvial moderada, fazendo com que o zero  
1119 de velocidade não atingisse a superfície no regime de enchente. Como resultado,  
1120 houve dominância de velocidades de vazante, abrangendo um período de pouco  
1121 mais do que quatro dias, enquanto que o regime de enchente cobriu apenas um dia.  
1122 A máxima velocidade de enchente foi de  $0,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  observada no fundo, enquanto que  
1123 a máxima velocidade de vazante foi de  $-0,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  encontrada apenas na superfície  
1124 entre os dias 13 e 14 de agosto e passando do meio da coluna d'água no dia 16 de  
1125 agosto. Este comportamento acontece porque os ventos de NE não atuaram por  
1126 tempo suficiente e nem possuem uma alta velocidade para quebrar a estratificação  
1127 vertical imposta pela descarga fluvial no início do regime de vazante; à medida  
1128 que os ventos de NE seguem atuando e atingem sua intensidade máxima no final  
1129 do sistema frontal, a coluna d'água torna-se homogênea no dia 16 de agosto, com



(a)



(b)

Figura 43: (a) Variação temporal da velocidade do vento paralelo à costa resultante da passagem do sistema frontal no período de 12 a 17 de agosto de 2008. Valores positivos e negativos indicam ventos de SO e NE, respectivamente. (b) Variação local do componente de velocidade  $v$  forçada pelo sistema frontal. Valores  $v > 0$  e  $v < 0$  indicam movimentos de enchente e vazante, respectivamente.

1130 velocidades de  $-0,8 \text{ m.s}^{-1}$  e  $-0,7 \text{ m.s}^{-1}$  na superfície e no fundo, respectivamente. No  
 1131 final do ciclo, observa-se um cisalhamento vertical de velocidade pouco intenso,  
 1132 que vai de  $-0,1 \text{ m.s}^{-1}$  na superfície a  $0,1 \text{ m.s}^{-1}$  no fundo, representando uma fraca  
 1133 influência do componente baroclínico da força do gradiente de pressão. A troca do  
 1134 regime de enchente para o de vazante ocorreu dentro do dia 13 de agosto, apenas  
 1135  $\sim 2$  horas após a troca de direção dos ventos.

1136 A salinidade superficial deste ciclo (**Fig. 44**) se mantém abaixo de  $10 \text{ ‰}$  du-  
 1137 rante toda série temporal, podendo ser atribuída à descarga fluvial moderada.  
 1138 Como não há período de enchente na superfície da coluna d'água, não ocorrem

1139 grandes variações de salinidade ao decorrer do ciclo, oscilando no entorno do valor  
 1140 de 5,5 ‰. Os valores mínimo ( $\sim 1$  ‰) e máximo (10 ‰) de salinidade são obser-  
 1141 vados ambos no final do ciclo, com o valor mínimo sendo encontrado depois da  
 1142 homogeneização da coluna de água (16 de agosto) e o máximo acompanhando o  
 1143 enfraquecimento da velocidade de vazante.

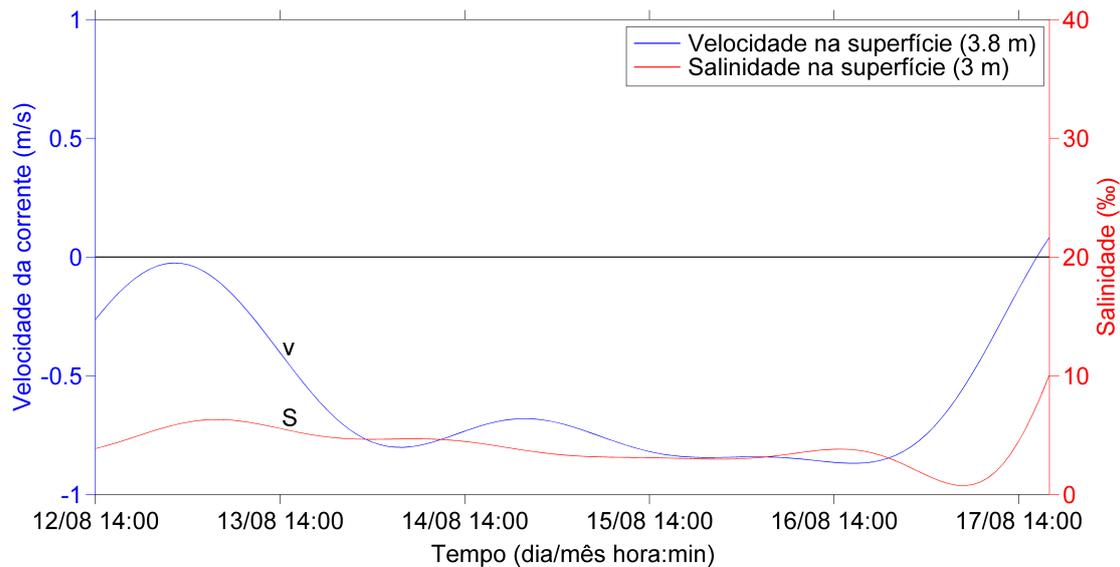


Figura 44: Série temporal do componente de velocidade  $v$  (azul) e de salinidade (vermelho) na superfície da coluna d'água durante o ciclo de enchente-vazante que cobriu o período entre 12 a 17 de agosto de 2008. Valores  $v > 0$  e  $v < 0$  indicam movimentos de enchente e vazante, respectivamente.

1144 Na série temporal de salinidade e de velocidade no fundo (**Fig. 45**), observa-se  
 1145 uma variação brusca de salinidade partindo de seu valor inicial de  $\sim 8$  ‰ para o seu  
 1146 valor máximo durante o ciclo ( $\sim 31,5$  ‰) em pouco menos do que um dia, com uma  
 1147 defasagem de aproximadamente 8 horas entre os picos de velocidade de enchente  
 1148 e de salinidade. A salinidade volta a cair com o enfraquecimento da velocidade e  
 1149 troca de direção para vazante, atingindo o valor de  $\sim 3,5$  ‰ que se mantém por  
 1150 aproximadamente dois dias e meio apesar das variações na velocidade. O valor  
 1151 mínimo de salinidade ( $\sim 1$  ‰) é alcançado aproximadamente 14 horas depois do

1152 pico de velocidade de vazante, possuindo o mesmo valor mínimo observado na  
 1153 superfície, o que reforça a ideia de homogeneização da coluna de água após o dia  
 1154 16 de agosto. Devido à perda de intensidade da velocidade e posterior troca de  
 1155 direção para enchente no final do ciclo, a salinidade sofre um aumento e finaliza o  
 1156 ciclo de enchente-vazante com aproximadamente 17 ‰.

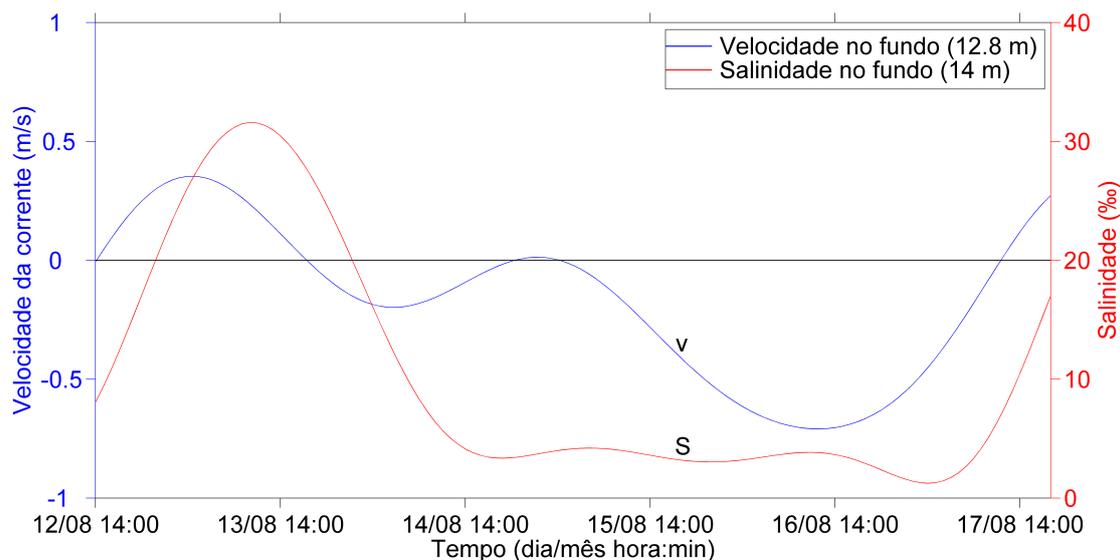


Figura 45: Série temporal do componente de velocidade  $v$  (azul) e de salinidade (vermelho) no fundo da coluna d'água durante o ciclo de enchente-vazante que cobriu o período entre 12 a 17 de agosto de 2008. Valores  $v > 0$  e  $v < 0$  indicam movimentos de enchente e vazante, respectivamente.

1157 O perfil médio do componente de velocidade  $v$  (**Fig. 46**) possui somente  
 1158 velocidades na direção de vazante como resultado da descarga fluvial intermediária  
 1159 e fracos ventos de SO. No geral, as magnitudes das velocidades são altas, com um  
 1160 máximo de aproximadamente  $-0,65 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  na superfície e um mínimo de  $\sim -0,17$   
 1161  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  no fundo. Quanto aos desvios padrão, diferentemente dos outros ciclos de  
 1162 enchente-vazante já descritos, os maiores valores foram observados no fundo em vez  
 1163 da superfície. O maior desvio padrão foi de  $0,33 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  em 11,3 m de profundidade  
 1164 e o menor foi de  $0,29 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  na superfície. Em média, o valor de desvio padrão foi

1165 de  $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

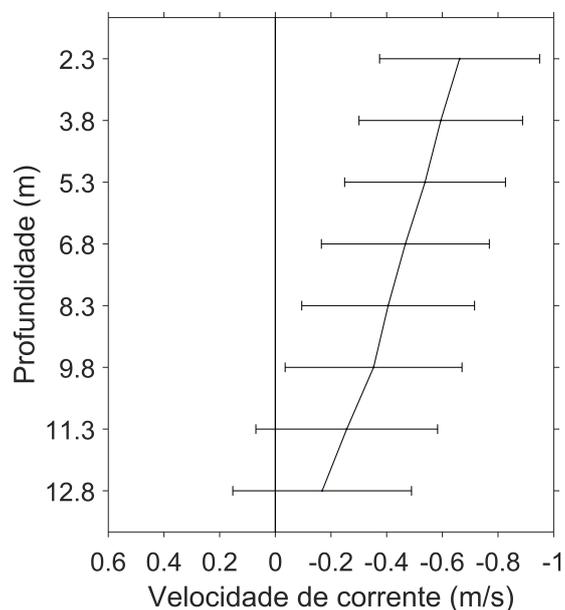


Figura 46: Perfil vertical médio do componente de velocidade  $v$  correspondente ao ciclo de enchente-vazante de 12 a 17 de agosto de 2008. As barras horizontais representam o desvio padrão de velocidade por profundidade. Valores  $v > 0$  e  $v < 0$  indicam movimentos de enchente e vazante, respectivamente.

1166 De acordo com o Diagrama Estratificação-circulação deste ciclo (**Fig. 47**), o  
1167 estuário foi classificado como tipo 2b (parcialmente misturado e com alta estrati-  
1168 ficação vertical), em desacordo com seu perfil vertical médio unidirecional que é  
1169 mais característico do tipo 1 (bem misturado). Segundo o seu valor de  $\delta S$  de  $7,5$   
1170 ‰ e a classificação de PRITCHARD (1989), este ciclo de enchente-vazante pode  
1171 ser classificado como tipo 2a (parcialmente misturado e com fraca estratificação  
1172 vertical).

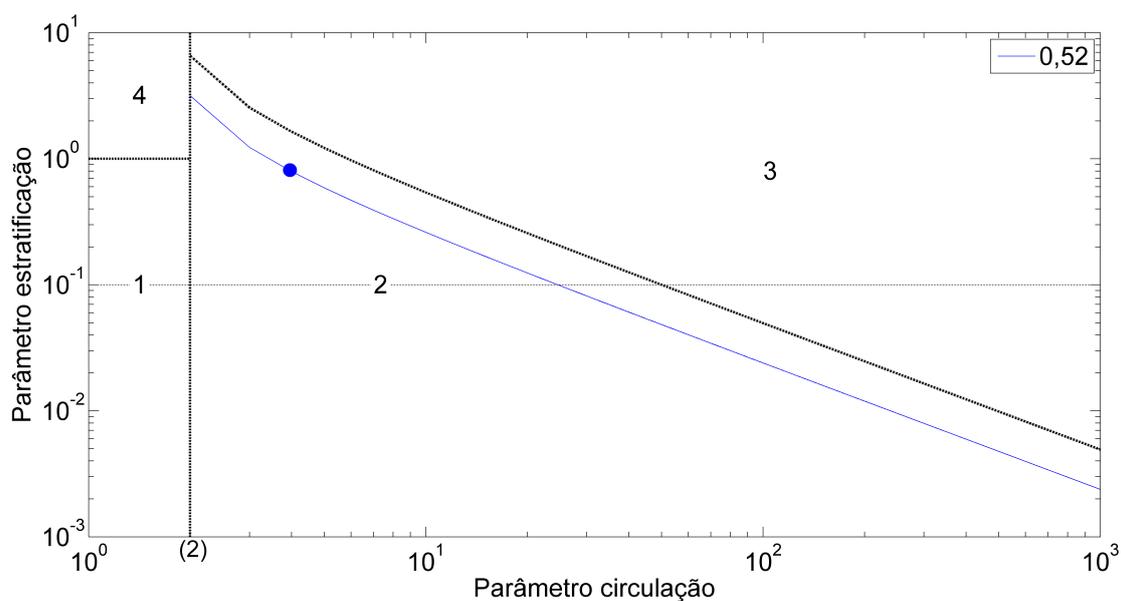


Figura 47: Diagrama Estratificação-circulação segundo HANSEN & RATTRAY (1966) correspondente ao ciclo de enchente-vazante de 12 a 17 de agosto de 2008. O parâmetro circulação no eixo das abscissas é definido como  $v_s/v_f$  e o parâmetro estratificação no eixo das ordenadas é definido como  $\delta S/\bar{s}$ . Em azul: curva paramétrica do número adimensional  $\nu$ .

#### 1173 4.2.2.3. Ciclo de Enchente-Vazante de 14 a 22 de novembro de 2011

1174 Este ciclo apresentou um valor intermediário de descarga fluvial de  $1.660 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .  
 1175 O sistema frontal atuante (**Fig. 48a**) tem seu início um dia e meio após o ciclo  
 1176 de enchente-vazante (**Fig. 48b**) ter começado, mas tanto o ciclo de enchente-  
 1177 vazante quanto o sistema frontal terminam exatamente no mesmo momento. A  
 1178 duração total da frente meteorológica foi longa — seis dias e algumas horas —,  
 1179 apresentando uma clara diferença entre os períodos de atuação dos ventos de SO  
 1180 (pouco mais do que um dia) e de NE (cinco dias). Também há uma discrepância  
 1181 entre as velocidades máximas dos ventos, que foi de  $\sim 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  para os ventos de SO  
 1182 e de  $\sim 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  para os ventos de NE. A troca de direção de SO para NE ocorreu  
 1183 entre os dias 16 e 17 de novembro.

1184 O ciclo de enchente-vazante forçado por este sistema frontal (**Fig. 48b**) tam-

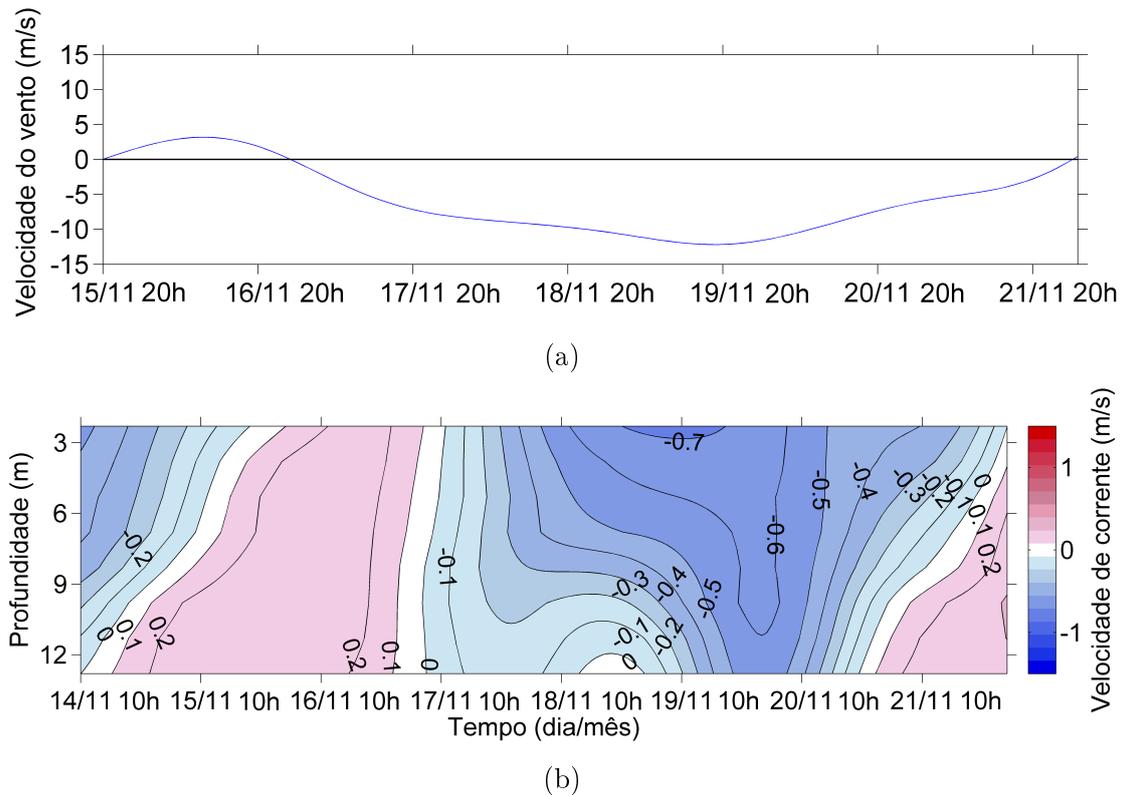


Figura 48: (a) Variação temporal da velocidade do vento paralelo à costa resultante da passagem do sistema frontal no período de 14 a 22 de novembro de 2011. Valores positivos e negativos indicam ventos de SO e NE, respectivamente. (b) Variação local do componente de velocidade  $v$  forçada pelo sistema frontal. Valores  $v > 0$  e  $v < 0$  indicam movimentos de enchente e vazante, respectivamente.

1185 bém apresentou uma duração total bastante longa, de quase 8 dias divididos entre  
 1186 os regimes de enchente ( $\sim 3$  dias) e de vazante ( $\sim 5$  dias). A máxima velocidade de  
 1187 enchente foi de apenas  $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , abrangendo toda a coluna d'água, enquanto que a  
 1188 máxima velocidade de vazante foi de  $-0,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  encontrada próximo da superfície.  
 1189 A troca de direção de enchente para vazante ocorreu nas proximidades do dia 17  
 1190 de novembro, aproximadamente 7 horas após a mudança de direção dos ventos.  
 1191 Logo após a troca de regimes e entrada dos ventos de NE, a coluna de água passa  
 1192 a ganhar velocidade na direção de vazante com o decorrer do tempo, exceto em  
 1193 profundidades maiores do que  $10,5 \text{ m}$  até o dia 19 de novembro. O vento de NE,

1194 apesar de intenso neste intervalo de tempo ( $\sim 10 \text{ m.s}^{-1}$ ), ainda não possui força  
1195 suficiente para ocasionar a mistura em toda coluna d'água, promovendo um in-  
1196 tenso cisalhamento vertical da corrente que chega a zero de velocidade no fundo.  
1197 À medida que a velocidade do vento de NE aumenta, ocorre enfraquecimento do  
1198 cisalhamento vertical e posterior homogeneização da coluna de água (final do dia  
1199 19 de novembro), que é observada após o pico de velocidade do vento de NE com  
1200 a mesma defasagem de tempo já mencionada ( $\sim 7$  horas). O cisalhamento vertical  
1201 de velocidade também é recorrente no início e no fim do ciclo, com variações que  
1202 vão de  $-0,2$  a  $0,2 \text{ m.s}^{-1}$  e de  $-0,4$  a  $0,2 \text{ m.s}^{-1}$ , respectivamente, da superfície ao fundo  
1203 da coluna d'água.

1204 A salinidade superficial deste ciclo (**Fig. 49**) é inicialmente baixa ( $\sim 3,5 \text{ ‰}$ ),  
1205 aumentando para o valor máximo de aproximadamente  $27,5 \text{ ‰}$  em quase 3 dias,  
1206  $\sim 14$  horas depois do pico de velocidade de enchente. À medida que a velocidade  
1207 perde intensidade e muda para regime de vazante, a salinidade passa a diminuir  
1208 e atinge o valor de  $\sim 1,5 \text{ ‰}$  no dia 20 de novembro, aproximadamente um dia  
1209 depois do máximo de velocidade de vazante. Próximo ao final do ciclo, ocorre um  
1210 pequeno aumento e posterior decréscimo de salinidade para o seu valor mínimo  
1211 durante a série ( $0 \text{ ‰}$ ), não acompanhando a diminuição linear de velocidade na  
1212 superfície. Novamente há um pequeno incremento na salinidade no final do ciclo,  
1213 finalizando com um valor de  $\sim 4 \text{ ‰}$ .

1214 Na série temporal de salinidade e de velocidade no fundo (**Fig. 50**), a salinidade  
1215 também é inicialmente baixa ( $\sim 6 \text{ ‰}$ ), subindo para  $\sim 32,5 \text{ ‰}$  (valor máximo do  
1216 ciclo) em aproximadamente um dia e meio,  $\sim 13$  horas depois da máxima velocidade  
1217 de enchente. A salinidade se mantém acima de  $30 \text{ ‰}$  durante todo o regime de  
1218 enchente, posteriormente sofrendo uma forte diminuição à medida que a velocidade  
1219 superficial oscila no entorno de zero e definitivamente muda de direção, chegando  
1220 a seu valor mínimo ( $< 1 \text{ ‰}$ ) 12 horas após o pico de velocidade de vazante.

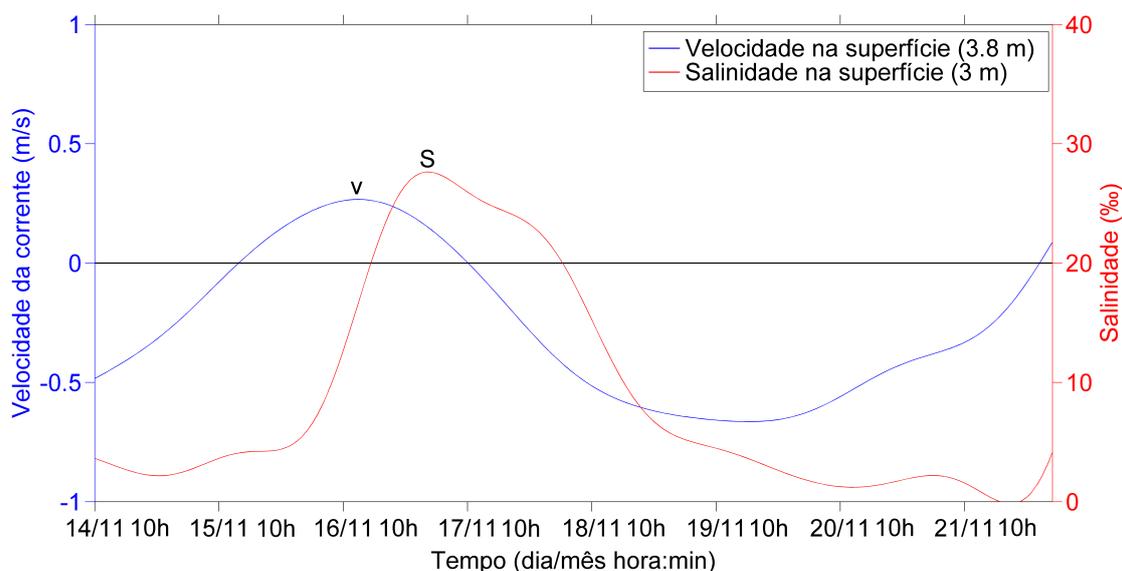


Figura 49: Série temporal do componente de velocidade  $v$  (azul) e de salinidade (vermelho) na superfície da coluna d'água durante o ciclo de enchente-vazante que cobriu o período entre 14 a 22 de novembro de 2011. Valores  $v > 0$  e  $v < 0$  indicam movimentos de enchente e vazante, respectivamente.

1221 Devido ao enfraquecimento da velocidade e posterior intensificação da velocidade  
 1222 de enchente no final do ciclo, a salinidade parte de seu valor mínimo para  $\sim 31$   
 1223 ‰ em um intervalo de quase dois dias. Durante o intenso cisalhamento vertical da  
 1224 corrente que ocorreu entre os dias 18 e 19 de novembro, a diferença de salinidade  
 1225 entre a superfície e o fundo foi de  $9,5$  ‰, passando a ser aproximadamente zero  
 1226 após a homogeneização da coluna de água, que foi observada no final do dia 19 de  
 1227 novembro.

1228 O perfil médio do componente de velocidade  $v$  (**Fig. 51**) apresenta um domínio  
 1229 quase total de velocidades de vazante, com troca de direção ocorrendo próxima ao  
 1230 fundo da coluna d'água ( $\sim 12$  m de profundidade). A velocidade máxima deste  
 1231 perfil foi de aproximadamente  $-0,31 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  observada na superfície, enquanto que a  
 1232 máxima velocidade de enchente foi encontrada no fundo com um valor próximo de  
 1233 zero ( $\sim 0,01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). O maior e o menor desvio padrão foi de  $0,31 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  em  $3,8$  m

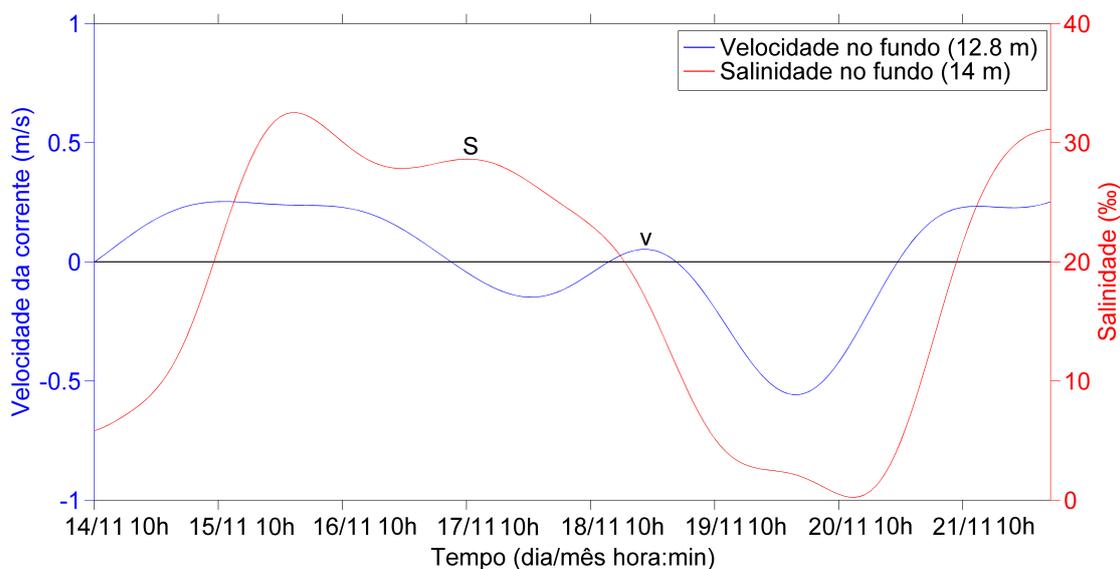


Figura 50: Série temporal do componente de velocidade  $v$  (azul) e de salinidade (vermelho) no fundo da coluna d'água durante o ciclo de enchente-vazante que cobriu o período entre 14 a 22 de novembro de 2011. Valores  $v > 0$  e  $v < 0$  indicam movimentos de enchente e vazante, respectivamente.

1234 de profundidade e  $0,23 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  no fundo da coluna d'água, respectivamente. O valor  
 1235 médio de desvio padrão deste perfil foi relativamente baixo ( $0,28 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), o menor  
 1236 dentre os ciclos de enchente-vazante já descritos.

1237 De acordo com o Diagrama Estratificação-circulação deste ciclo (**Fig. 52**), ele  
 1238 se encontra no limite entre estuários do tipo 1 (bem misturado) e 2b (parcialmente  
 1239 misturado e com alta estratificação vertical). Como o perfil médio de velocidade  
 1240 é bidirecional apenas bem próximo do fundo, a classificação mais apropriada seria  
 1241 de tipo 1 ou tipo 2a (parcialmente misturado e com fraca estratificação vertical);  
 1242 entretanto, segundo o seu valor de  $\delta S$  de  $9,4 \text{ ‰}$  e a classificação de PRITCHARD  
 1243 (1989), o ciclo de enchente-vazante em questão seria mais adequadamente classifi-  
 1244 cado como estuário de tipo 2a.

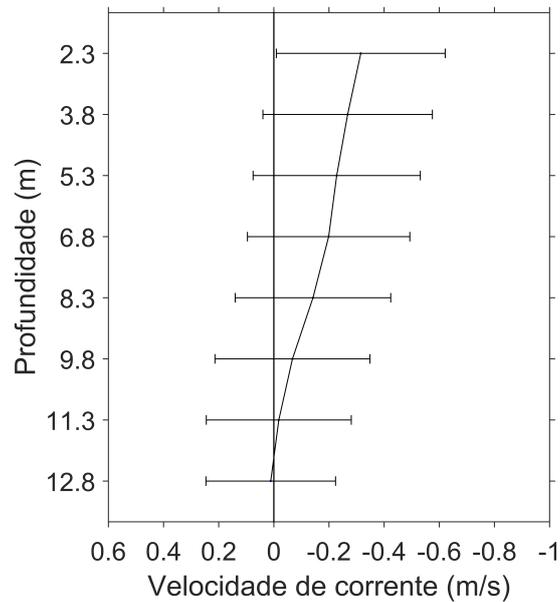


Figura 51: Perfil vertical médio do componente de velocidade  $v$  correspondente ao ciclo de enchente-vazante de 14 a 22 de novembro de 2011. As barras horizontais representam o desvio padrão de velocidade por profundidade. Valores  $v > 0$  e  $v < 0$  indicam movimentos de enchente e vazante, respectivamente.

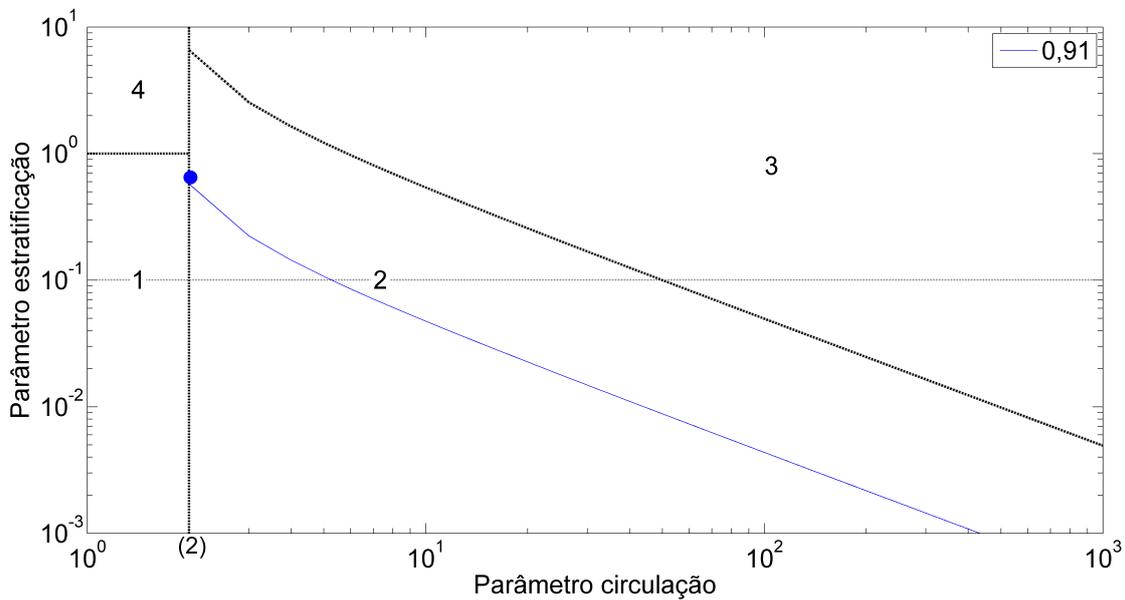


Figura 52: Diagrama Estratificação-circulação segundo HANSEN & RATTRAY (1966) correspondente ao ciclo de enchente-vazante de 14 a 22 de novembro de 2011. O parâmetro circulação no eixo das abscissas é definido como  $v_s/v_f$  e o parâmetro estratificação no eixo das ordenadas é definido como  $\delta S/\bar{s}$ . Em azul: curva paramétrica do número adimensional  $\nu$ .

### 1245 4.2.3. Descarga Fluvial Alta

#### 1246 4.2.3.1. Ciclo de Enchente-Vazante de 9 a 14 de outubro de 2005

1247 A descarga fluvial média deste ciclo foi a mais alta dentre todos ciclos de  
1248 enchente-vazante descritos neste trabalho, apresentando um valor de  $3.902 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .  
1249 O sistema frontal deste período (**Fig. 53a**) tem seu início e fim aproximadamente  
1250 20 horas antes do ciclo de enchente-vazante resultante (**Fig. 53b**), com uma  
1251 duração total no entorno de 5 dias e meio. O tempo de atuação dos ventos de  
1252 NE ( $\sim 3$  dias e meio) é mais prolongado do que o dos ventos de SO ( $\sim 2$  dias),  
1253 basicamente devido à oscilação de velocidade ao redor de zero que ocorre no final  
1254 da frente, sendo caracterizada por fracos ventos de NE (máximo de  $\sim -1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ).  
1255 A velocidade máxima dos ventos de NE e de SO foi a mesma, apresentando um  
1256 valor absoluto de aproximadamente  $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . A troca de direção de SO para NE  
1257 ocorreu entre os dias 10 e 11 de outubro.

1258 O ciclo de enchente-vazante (**Fig. 53b**) teve a mesma duração de sua respectiva  
1259 frente meteorológica ( $\sim 5$  dias e meio). A descarga fluvial foi tão intensa que  
1260 sobrepôs-se totalmente à ação do vento de SO, consequentemente ocasionando a  
1261 ausência de um regime de enchente e apenas apresentando velocidade igual à zero  
1262 no início do ciclo no fundo da coluna d'água. O resto do ciclo é dominado quase  
1263 inteiramente por velocidades na direção de vazante, possuindo uma magnitude  
1264 máxima de  $-0,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  observada somente na superfície no final do dia 13 de outubro.  
1265 A máxima velocidade de enchente foi de apenas  $0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  e é encontrada após o  
1266 término do regime de vazante, ocupando as profundidades do meio ao fundo da  
1267 coluna de água. Como a ação do vento de NE não é contrária à intensa descarga  
1268 fluvial, é possível observar seu efeito na corrente através da isolinha de  $-0,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ :  
1269 à medida que o vento de NE começa a atuar, tem-se um aprofundamento desta  
1270 isolinha antes mesmo do pico de velocidade do vento, aproximadamente 5 horas

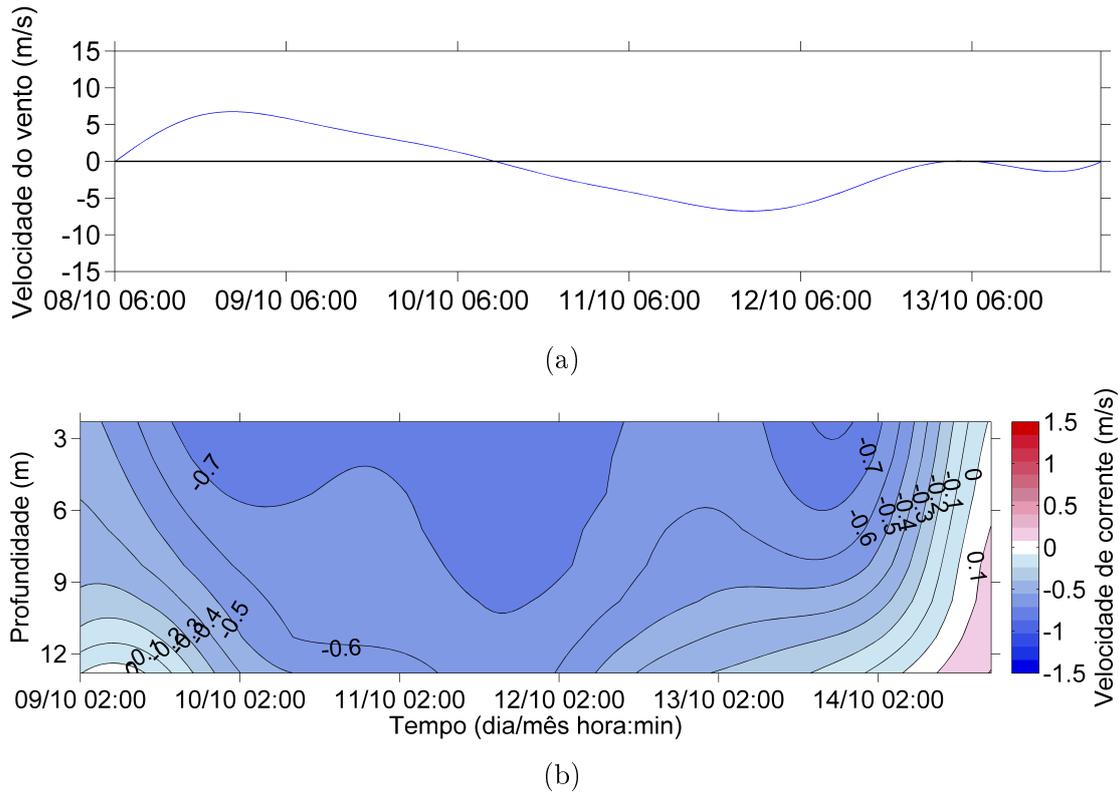


Figura 53: **(a)** Variação temporal da velocidade do vento paralelo à costa resultante da passagem do sistema frontal no período de 9 a 14 de outubro de 2005. Valores positivos e negativos indicam ventos de SO e NE, respectivamente. **(b)** Variação local do componente de velocidade  $v$  forçada pelo sistema frontal. Valores  $v > 0$  e  $v < 0$  indicam movimentos de enchente e vazante, respectivamente.

1271 antes; com o enfraquecimento do vento de NE, a velocidade superficial diminui  
 1272 para  $-0,6 \text{ m.s}^{-1}$  e a isolinha de  $-0,7 \text{ m.s}^{-1}$  somente retorna quando o vento sofre  
 1273 um pequeno aumento, restringindo-se à superfície devido à baixa intensidade do  
 1274 vento. Os mais fortes cisalhamentos verticais de velocidade são observados no  
 1275 início do ciclo ( $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ ) e entre os dias 13 e 14 de outubro ( $1 \text{ m.s}^{-1}$ ), este último  
 1276 coincidindo com as fracas intensidades do vento de NE encontradas no fim da frente  
 1277 meteorológica. O final do ciclo é marcado por um fraco cisalhamento vertical da  
 1278 corrente onde as velocidades variam de  $-0,1$  a  $0,1 \text{ m.s}^{-1}$  da superfície ao fundo,  
 1279 respectivamente, provavelmente respondendo à entrada de um vento de SO na

1280 sequência do sistema frontal em questão.

1281 A salinidade deste ciclo na superfície (**Fig. 54**) é no geral muito baixa, apre-  
 1282 sentando valores menores do que 5 ‰ em sua maioria. Inicialmente, a velocidade  
 1283 superficial é de  $\sim -0,45 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  e a salinidade é de aproximadamente 1,5 ‰, mantendo  
 1284 este valor até o dia 13 de outubro mesmo com as pequenas oscilações de veloci-  
 1285 dade. Há um pequeno aumento de salinidade entre os dias 13 e 14 de outubro  
 1286 que ocorre aproximadamente 14 horas depois do enfraquecimento da velocidade  
 1287 no dia 13, chegando a apenas 2,5 ‰. Em seguida, o valor mínimo do ciclo é atin-  
 1288 gido (0 ‰) ao redor de 10 horas após ter ocorrido uma pequena intensificação da  
 1289 velocidade de vazante. Com a posterior tendência dos valores de velocidade em  
 1290 se aproximar do zero, a salinidade aumenta e finaliza o ciclo de enchente-vazante  
 1291 com seu valor máximo ( $\sim 11 \text{ ‰}$ ), em conjunto com uma velocidade de enchente de  
 1292 aproximadamente  $0,05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

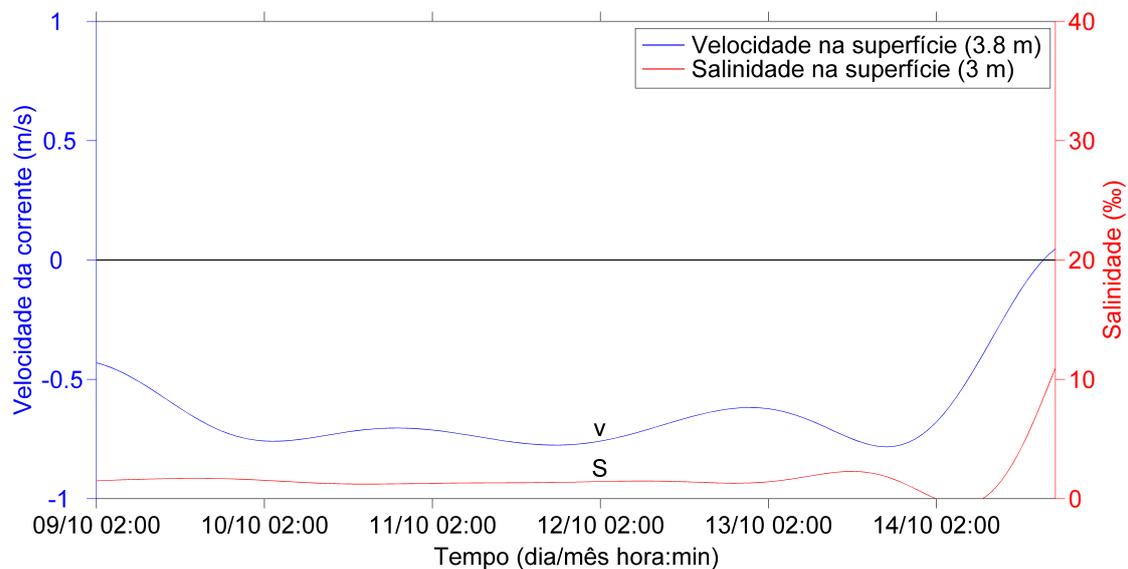


Figura 54: Série temporal do componente de velocidade  $v$  (azul) e de salinidade (vermelho) na superfície da coluna d'água durante o ciclo de enchente-vazante que cobriu o período entre 9 a 14 de outubro de 2005. Valores  $v > 0$  e  $v < 0$  indicam movimentos de enchente e vazante, respectivamente.

1293 A salinidade inicial no fundo (**Fig. 55**) é a mesma observada na superfície  
1294 ( $\sim 1,5 \text{ ‰}$ ), porém com uma velocidade correspondente igual à zero. O pequeno  
1295 aumento da velocidade para aproximadamente  $0,05 \text{ m.s}^{-1}$  provoca um acréscimo  
1296 nos valores de salinidade, que chega a aproximadamente de  $7,5 \text{ ‰}$  dentro de 10  
1297 horas após este pico de velocidade. Em consequência do início do regime de va-  
1298 zante, a salinidade diminui para o seu valor mínimo de aproximadamente  $0,05 \text{ ‰}$ ,  
1299 oscilando no entorno de  $1,5 \text{ ‰}$  até o dia 13 de outubro. No final deste dia, a  
1300 salinidade chega em  $\sim 9,5 \text{ ‰}$  à medida que a velocidade de vazante perde intensi-  
1301 dade, posteriormente caindo para um valor ao redor de  $4,5 \text{ ‰}$  que não acompanha  
1302 o comportamento da velocidade no fundo, mas sim o da velocidade superficial.  
1303 Este mínimo de salinidade no fundo ocorre aproximadamente 3 horas depois do  
1304 mínimo de salinidade na superfície ( $0 \text{ ‰}$ ), este último respondendo à uma vari-  
1305 ação de velocidade superficial que aconteceu  $\sim 10$  horas antes. A salinidade no  
1306 fundo volta a aumentar conforme a velocidade no fundo troca para a direção de  
1307 enchente, encerrando o ciclo com valores de aproximadamente  $13 \text{ ‰}$  e de  $0,2 \text{ m.s}^{-1}$ ,  
1308 respectivamente.

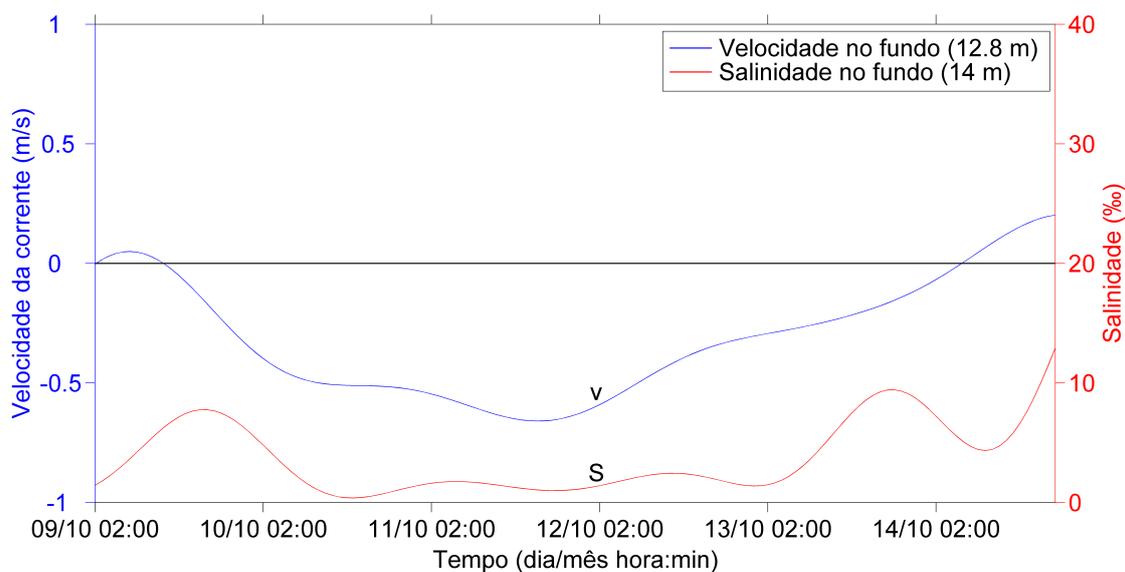


Figura 55: Série temporal do componente de velocidade  $v$  (azul) e de salinidade (vermelho) no fundo da coluna d'água durante o ciclo de enchente-vazante que cobriu o período entre 9 a 14 de outubro de 2005. Valores  $v > 0$  e  $v < 0$  indicam movimentos de enchente e vazante, respectivamente.

1309 O perfil médio do componente de velocidade  $v$  (**Fig. 56**) apresenta velocidades  
 1310 de vazante com intensidade máxima de  $\sim -0,65 \text{ m.s}^{-1}$  observada na superfície. O  
 1311 valor mínimo de velocidade é de aproximadamente  $-0,31 \text{ m.s}^{-1}$  encontrado no fundo  
 1312 da coluna d'água, coincidindo com o maior desvio padrão do perfil ( $0,25 \text{ m.s}^{-1}$ ).  
 1313 Diferentemente da maioria dos ciclos de enchente-vazante já descritos, o maior e  
 1314 o menor valor de desvio padrão deste ciclo é encontrado no fundo e na superfície,  
 1315 respectivamente, este último sendo apenas  $0,17 \text{ m.s}^{-1}$ . O valor médio de desvio  
 1316 padrão também foi baixo, relativamente, sendo igual à  $0,2 \text{ m.s}^{-1}$ .

1317 O Diagrama Estratificação-circulação (HANSEN & RATTRAY, 1966) deste  
 1318 ciclo (**Fig. 57**) o classifica como estuário de tipo 1 (bem misturado), em concor-  
 1319 dância com o perfil médio unidirecional do componente de velocidade  $v$  e com seu  
 1320 baixo valor de  $\delta S$  ( $2,1 \text{ ‰}$ ).

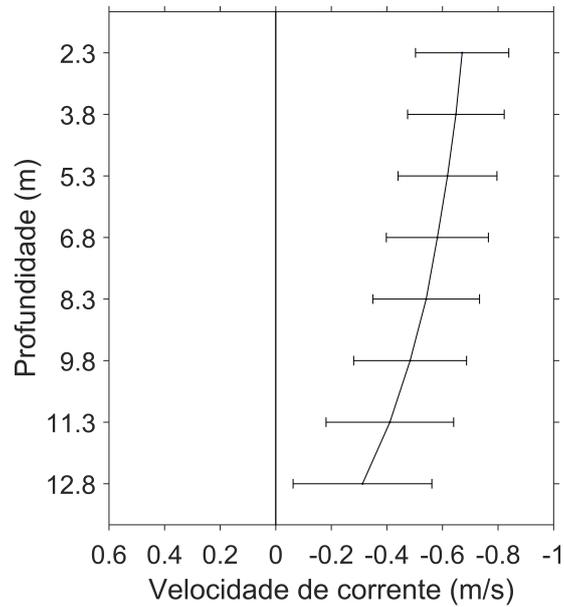


Figura 56: Perfil vertical médio do componente de velocidade  $v$  correspondente ao ciclo de enchente-vazante de 9 a 14 de outubro de 2005. As barras horizontais representam o desvio padrão de velocidade por profundidade. Valores  $v < 0$  indicam movimentos de vazante.

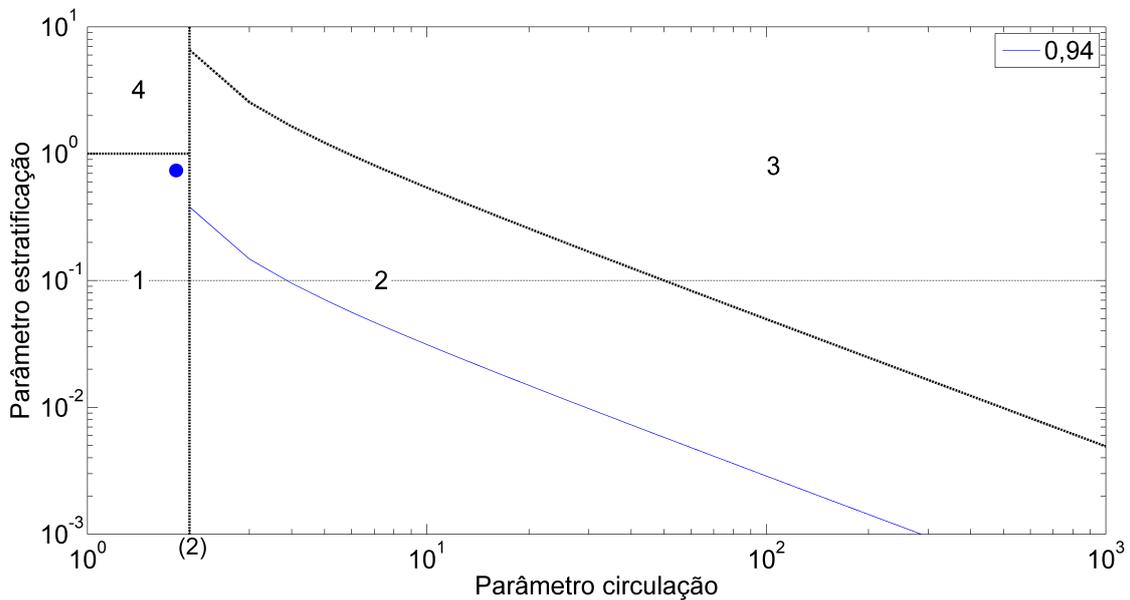


Figura 57: Diagrama Estratificação-circulação segundo HANSEN & RATTRAY (1966) correspondente ao ciclo de enchente-vazante de 9 a 14 de outubro de 2005. O parâmetro circulação no eixo das abscissas é definido como  $v_s/v_f$  e o parâmetro estratificação no eixo das ordenadas é definido como  $\delta S/\bar{s}$ . Em azul: curva paramétrica do número adimensional  $\nu$ .

### 1321 4.2.3.2. Ciclo de Enchente-Vazante de 19 a 24 de agosto de 2010

1322 Este ciclo possui uma descarga fluvial bastante alta que se aproxima do ciclo  
1323 anterior, apresentando um valor médio de  $3.754 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . A forçante meteorológica  
1324 durante este período (**Fig. 58a**) tem seu início aproximadamente 10 horas antes  
1325 do ciclo de enchente-vazante resultante (**Fig. 58b**), também terminando antes  
1326 com uma diferença de  $\sim 15$  horas. A duração total do sistema frontal foi de quase  
1327 cinco dias, ressaltando que o intervalo de tempo de atuação dos ventos de NE  
1328 (três dias e meio) foi consideravelmente maior do que o dos ventos de SO (um dia  
1329 e meio). O vento de NE também apresentou velocidades maiores do que o vento  
1330 de SO, visto que as magnitudes máximas observadas foram valores ao redor de  
1331  $-7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  e de  $3,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , respectivamente. A intensificação e o enfraquecimento do  
1332 vento de NE durante a passagem da frente não apresentou um comportamento  
1333 linear como o do vento de SO, ocorrendo oscilações no entorno do valor de  $-4,5$   
1334  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ . A máxima velocidade de NE somente é atingida no dia 23 de agosto após  
1335 uma diminuição de velocidade que ocorreu no dia 22 para o valor de  $\sim -3,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .  
1336 A mudança de direção de SO para NE ocorreu entre os dias 20 e 21 de agosto.

1337 O ciclo de enchente-vazante resultante (**Fig. 58b**) é dominado quase inteira-  
1338 mente por velocidades na direção de vazante, similar ao observado no ciclo anterior.  
1339 A intensa descarga fluvial não permitiu que a ação do vento de SO resultasse em  
1340 um regime de enchente que ocupasse toda a coluna de água, restringindo-se apenas  
1341 ao fundo e se estendendo por um dia e meio, mesmo tempo de atuação do vento  
1342 de SO. A troca para o regime de vazante ocorre aproximadamente 11 horas depois  
1343 da troca de direção do vento. De mesma forma, o regime de vazante abrangeu o  
1344 mesmo período do vento de NE, que foi de três dias e meio. A velocidade máxima  
1345 no regime de enchente foi de  $0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , porém chegando a  $0,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  no final do  
1346 ciclo, ocupando uma porção considerável da coluna d'água. A máxima velocidade  
1347 de vazante foi de  $-0,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , localizada em um núcleo na camada de superfície.

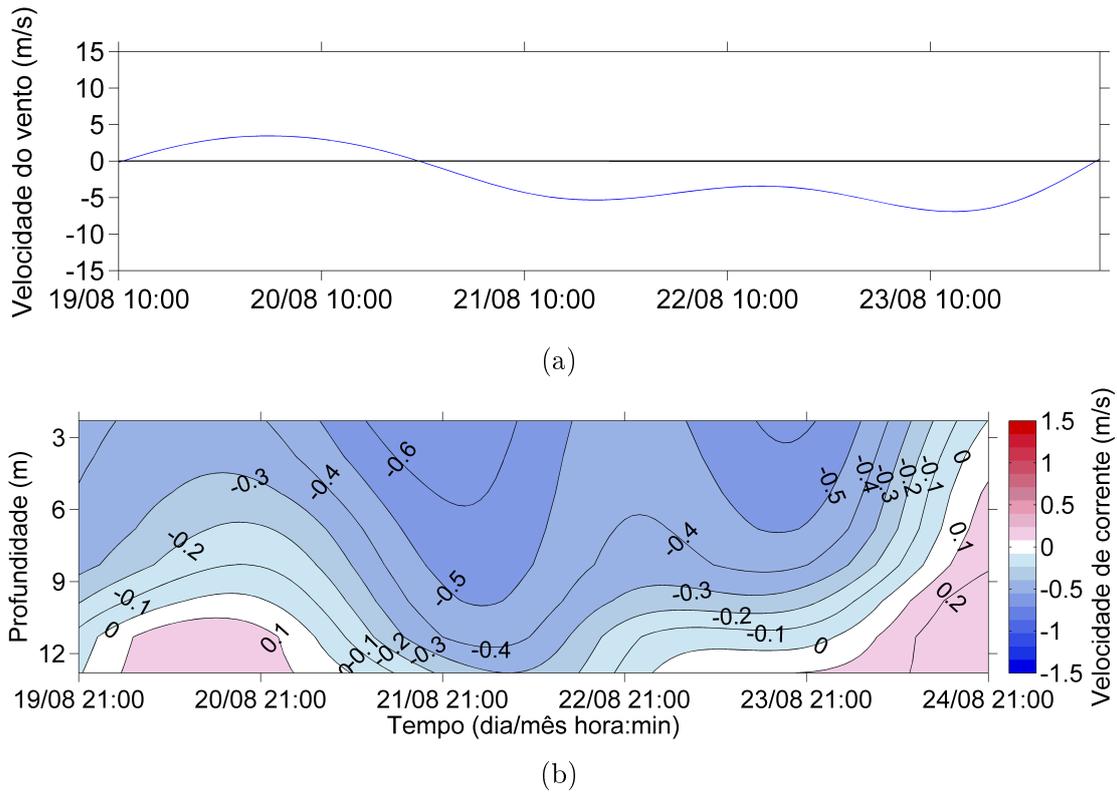


Figura 58: (a) Variação temporal da velocidade do vento paralelo à costa resultante da passagem do sistema frontal no período de 19 a 24 de agosto de 2010. Valores positivos e negativos indicam ventos de SO e NE, respectivamente. (b) Variação local do componente de velocidade  $v$  forçada pelo sistema frontal. Valores  $v > 0$  e  $v < 0$  indicam movimentos de enchente e vazante, respectivamente.

1348 As oscilações de velocidade do vento de NE ao final da frente são observadas na  
 1349 velocidade de corrente em média 7 horas depois, entre os dias 21 e 23 de agosto.  
 1350 Os picos de velocidade do vento de NE e o enfraquecimento que ocorre entre esses  
 1351 máximos são representados pelos aprofundamentos das isolinhas e por sua incli-  
 1352 nação em direção à superfície, respectivamente. A entrada de uma cunha salina  
 1353 no final do ciclo provoca um forte cisalhamento vertical da corrente que parte de  
 1354  $-0,6 \text{ m.s}^{-1}$  na superfície e chega a  $0,1 \text{ m.s}^{-1}$  no fundo, ocasionando uma diferença  
 1355 de quase dois dias entre o fim do regime de vazante no fundo e na superfície.

1356 A salidade na superfície deste ciclo (**Fig. 59**) possui valores próximos de zero

1357 durante toda série temporal em virtude da alta descarga fluvial, apresentando pe-  
 1358 quenas variações que acompanham o comportamento da velocidade na superfície.  
 1359 A velocidade é de aproximadamente  $-0,4 \text{ m.s}^{-1}$  no início do ciclo e a salinidade é de  
 1360 praticamente zero, aumentando para quase  $1 \text{ ‰}$   $\sim 18$  horas após ter ocorrido um  
 1361 pequeno decréscimo na velocidade. O próximo aumento de salinidade ocorre no  
 1362 dia 23 de agosto e também não é muito significativo ( $S \approx 1 \text{ ‰}$ ), respondendo com  
 1363 a mesma defasagem anterior ( $\sim 18$  horas) a um enfraquecimento na velocidade. O  
 1364 valor mínimo de salinidade ( $0 \text{ ‰}$ ) é atingido no dia 22 de agosto e entre os dias 23  
 1365 e 24, com extremos de velocidade muito próximos ( $\sim -0,6 \text{ m.s}^{-1}$ ). Praticamente não  
 1366 se observam velocidades de enchente na superfície, apenas no final do ciclo ao redor  
 1367 de  $0,05 \text{ m.s}^{-1}$ , coincidente com o valor máximo de salinidade de aproximadamente  
 1368  $4,5 \text{ ‰}$ .

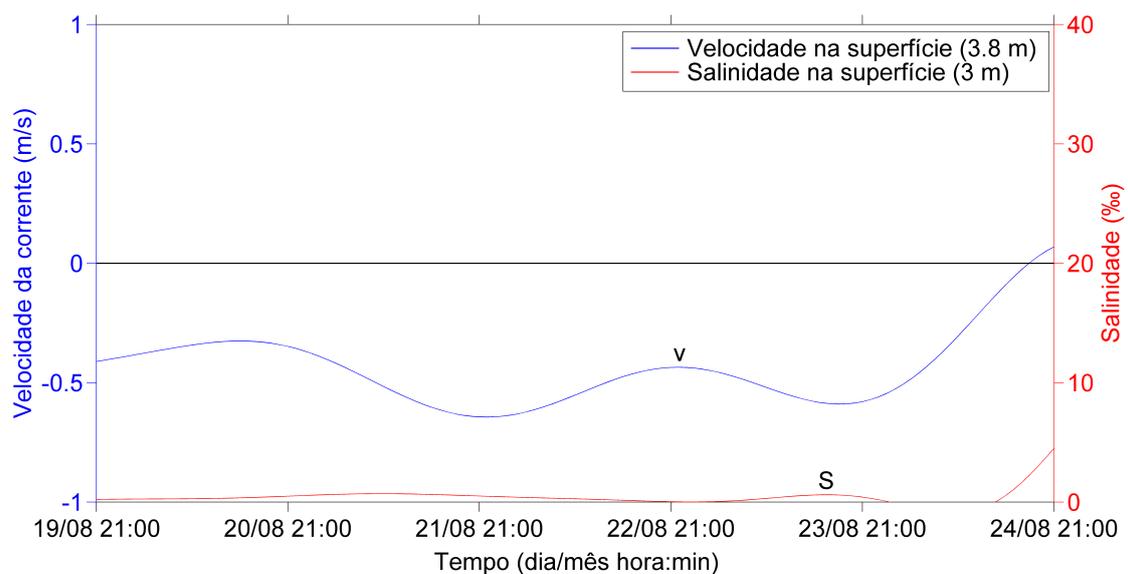


Figura 59: Série temporal do componente de velocidade  $v$  (azul) e de salinidade (vermelho) na superfície da coluna d'água durante o ciclo de enchente-vazante que cobriu o período entre 19 a 24 de agosto de 2010. Valores  $v > 0$  e  $v < 0$  indicam movimentos de enchente e vazante, respectivamente.

1369 A salinidade no fundo (**Fig. 60**) inicialmente apresenta o mesmo valor da

1370 superfície ( $\sim 0$  ‰), ao mesmo tempo em que a velocidade no fundo é também  
 1371 igual à zero, aumentando para  $\sim 19$  ‰ aproximadamente 12 horas após o pico  
 1372 de velocidade de enchente ( $\sim 0,17$  m.s<sup>-1</sup>). Aproximadamente um dia depois, a  
 1373 salinidade diminui novamente para zero antes mesmo do pico de velocidade de  
 1374 vazante ( $\sim -0,3$  m.s<sup>-1</sup>), mantendo-se ao redor de 1 ‰ até o dia 23 de agosto. A  
 1375 salinidade volta a sofrer um acréscimo aproximadamente 18 horas depois que a  
 1376 velocidade trocou de direção para enchente, chegando a seu valor máximo de 20  
 1377 ‰ no final do ciclo que coincide com a máxima velocidade de enchente ( $\sim 0,25$   
 1378 m.s<sup>-1</sup>).

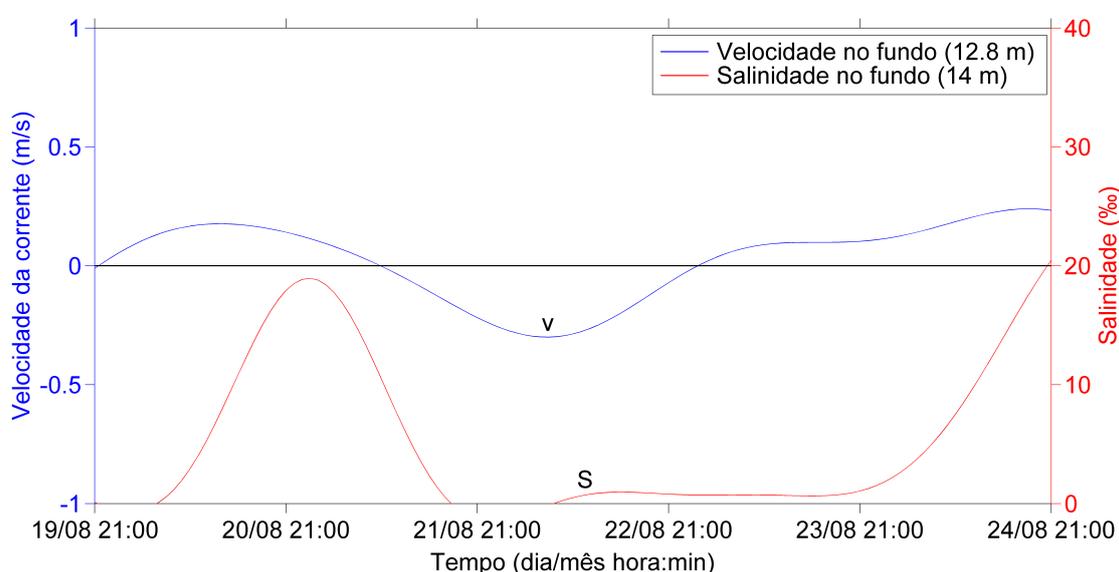


Figura 60: Série temporal do componente de velocidade  $v$  (azul) e de salinidade (vermelho) no fundo da coluna d'água durante o ciclo de enchente-vazante que cobriu o período entre 19 a 24 de agosto de 2010. Valores  $v > 0$  e  $v < 0$  indicam movimentos de enchente e vazante, respectivamente.

1379 O perfil médio do componente de velocidade  $v$  (**Fig. 61**) é praticamente  
 1380 unidirecional no sentido de vazante, somente apresentando velocidades de enchente  
 1381 próximo do fundo, em profundidades maiores do que 12 m. A velocidade máxima  
 1382 foi de aproximadamente  $-0,48$  m.s<sup>-1</sup> na superfície, enquanto que a de enchente foi

1383 de apenas  $\sim 0,02 \text{ m.s}^{-1}$  no fundo. A distribuição dos valores de desvio padrão foi  
 1384 similar ao ciclo anterior, com o valor máximo ( $0,21 \text{ m.s}^{-1}$ ) sendo observado próximo  
 1385 ao fundo e o valor mínimo ( $0,15 \text{ m.s}^{-1}$ ) na superfície da coluna de água. Em média,  
 1386 o desvio padrão deste perfil foi de apenas  $0,17 \text{ m.s}^{-1}$ , o menor dentre todos os ciclos  
 1387 de enchente-vazante descritos neste trabalho.

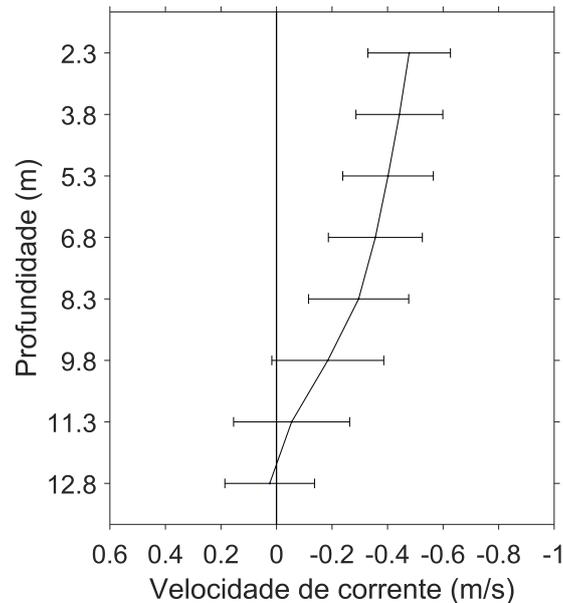


Figura 61: Perfil vertical médio do componente de velocidade  $v$  correspondente ao ciclo de enchente-vazante de 19 a 24 de agosto de 2010. As barras horizontais representam o desvio padrão de velocidade por profundidade. Valores  $v > 0$  e  $v < 0$  indicam movimentos de enchente e vazante, respectivamente.

1388 Considerando-se as características hidrográficas observadas neste período, prin-  
 1389 cipalmente com relação à presença de baixíssimos valores de salinidade, as hipóte-  
 1390 ses para a aplicação do Diagrama Estratificação-circulação de HANSEN & RAT-  
 1391 TRAY (1966) não foram satisfeitas por resultarem em um parametro de estrati-  
 1392 ficação muito alto, não condizente com os dados de salinidade do ciclo. Durante  
 1393 este período de observações, a classificação foi somente feita com base na diferença  
 1394 de salinidade entre a superfície e o fundo ( $\delta S = 4,6 \text{ ‰}$ ) e no perfil vertical médio  
 1395 do componente de velocidade  $v$ . Segundo a classificação de PRITCHARD (1989),

1396  $\delta S < 5$  unidades de sal representa um estuário tipo 1 (bem misturado).

### 1397 4.3. Simulações Teóricas dos Perfis Estacionários 1398 de Velocidade e Salinidade

#### 1399 4.3.1. Descarga Fluvial Baixa

##### 1400 4.3.1.1. Ciclo de Enchente-Vazante de 25 a 30 de outubro de 2006

1401 Apesar da diferença entre a salinidade média do fundo e da superfície ( $\delta S$ ) deste  
1402 ciclo ter sido maior do que 5 ‰ — indicando um estuário do tipo parcialmente  
1403 misturado e com fraca estratificação vertical —, a melhor simulação desse perfil  
1404 médio foi obtida considerando um atrito moderado no fundo (Equação 3.19a),  
1405 apresentando um Skill igual à 0,99 (**Fig. 62**). O perfil médio de velocidade  
1406 simulado é idêntico ao observado da superfície até 5,3 m de profundidade e também  
1407 no fundo da coluna de água. A diferença máxima entre os dados observados e os  
1408 simulados no meio da coluna de água chega a 0,04 m.s<sup>-1</sup>, apenas. Os índices RMAE  
1409 e RMSE obtidos foram iguais à 0,013 e 0,024, enquadrando este resultado dentro  
1410 da qualificação “excelente” e representando apenas 7 % da variação total dos dados  
1411 de velocidade, respectivamente.

1412 Os parâmetros livres e calculados através dos dados de campo para gerar o  
1413 maior valor possível de Skill são apresentados na **Tabela 9**. O valor do componente  
1414 do gradiente longitudinal de densidade,  $\partial\bar{\rho}/\partial y$ , utilizado nas simulações deste ciclo  
1415 foi intermediário, considerando a variação de valores de  $1 \times 10^{-3}$  a  $5 \times 10^{-3}$  kg.m<sup>-4</sup>  
1416 utilizada neste trabalho. O valor de  $k$  foi uma ordem de grandeza menor do  
1417 que o valor constante de  $2,5 \times 10^{-3}$ . A baixa intensidade de  $v_f$  e o alto valor de  $\bar{s}$   
1418 condizem com a baixa descarga fluvial (513 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>), que foi a menor de todos os  
1419 ciclos de enchente-vazante descritos. O valor negativo de  $\tau_{Wy}$  indica que o vento

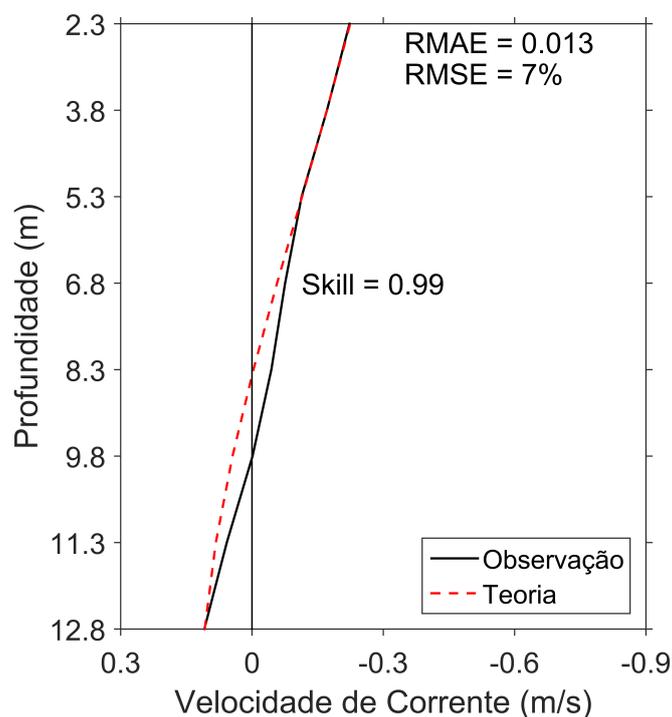


Figura 62: Perfil estacionário do componente de velocidade  $v$  observado (Observação) e simulado através da solução hidrodinâmica com atrito moderado (Teoria). Skill = 1 indica um ajuste perfeito entre valores observados e simulados. Perfil referente ao ciclo de enchente-vazante de 25 a 30 de outubro de 2006. Valores  $v < 0$  e  $v > 0$  indicam movimentos de vazante e de enchente, respectivamente.

1420 predominante que estava atuando durante este ciclo era no sentido estuário abaixo,  
 1421 conforme o observado nos dados de campo, visto que a direção estuário abaixo foi  
 1422 observada em aproximadamente 75 % dos casos neste período.

1423 O perfil estacionário de salinidade simulado (**Fig. 63**) apresentou o valor  
 1424 máximo de Skill (igual à 1), indicando um ajuste perfeito entre os dados superficiais  
 1425 e no fundo, também representando a fraca estratificação vertical indicada pelo  
 1426 baixo  $\delta S$ . Os índices RMAE e RMSE deste perfil foram iguais à 0,0023 e 0,32,  
 1427 classificando a qualidade dos resultados como “excelente” e representando apenas  
 1428 5 % da variação total dos dados de salinidade, respectivamente.

Tabela 9: Parâmetros livres e os obtidos através dos dados de campo (\*) utilizados nas simulações dos perfis estacionários do componente de velocidade  $v$  e de salinidade que resultaram no maior valor de Skill. Valores referentes ao ciclo de enchente-vazante de 25 a 30 de outubro de 2006.

Parâmetros livres e experimentais	Valores numéricos
$\frac{\partial \bar{p}}{\partial y}$	$2,6 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^{-4}$
$k$	$7,8 \times 10^{-4}$
$N_z$	$2,7 \times 10^{-3} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$
$K_z$	$2,7 \times 10^{-5} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$
* $v_f$	$-0,05 \text{ m.s}^{-1}$
* $\bar{s}$	$23,7 \text{ ‰}$
* $\tau_{Wy}$	$-0,019 \text{ N.m}^{-2}$

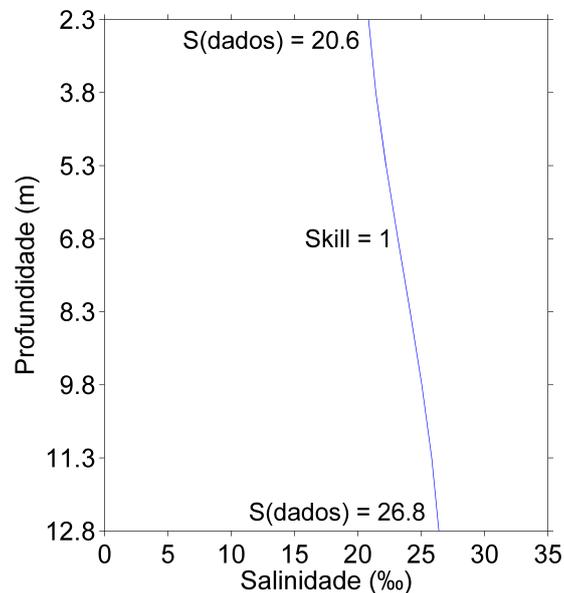


Figura 63: Perfil estacionário de salinidade simulado através da solução hidrodinâmica com atrito moderado. Skill = 1 indica um ajuste perfeito entre valores observados (“S(dados)”) e simulados na superfície e no fundo da coluna d’água. Perfil referente ao ciclo de enchente-vazante de 25 a 30 de outubro de 2006.

1429 A **Tabela 10** apresenta os valores dos coeficientes  $N_z$  e  $K_z$  que correspondem a  
 1430 um Skill intermediário de 0,50, representando os limites destes coeficientes para a  
 1431 reprodução dos perfis observados. Comparando com os valores destes coeficientes  
 1432 que geraram o maior valor de Skill (**Tab. 9**), os limites inferiores e superiores  
 1433 foram uma ordem de grandeza menor e maior, respectivamente.

Tabela 10: Limites superiores e inferiores dos coeficientes  $N_z$  e  $K_z$  correspondentes a um valor de Skill igual à 0,50, mantendo fixo os valores de  $K_z$  e  $N_z$ , respectivamente, pertencentes à Tabela 9. Limites referentes ao ciclo de enchente-vazante de 25 a 30 de outubro de 2006.

	Limite Inferior	Limite Superior
$N_z$	$4,5 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$5,1 \times 10^{-2} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
$K_z$	$4,1 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$1,4 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

#### 1434 4.3.1.2. Ciclo de Enchente-Vazante de 7 a 12 de janeiro de 2009

1435 Devido a este ciclo possuir um  $\delta S$  menor do que 5 ‰ (1,6 ‰), as simulações dos  
 1436 perfis verticais estacionários de velocidade e de salinidade foram feitas utilizando  
 1437 a Equação 3.19a, gerando um valor de Skill muito próximo de 1 (Skill = 0,99). Os  
 1438 perfis observado e simulado (**Fig. 64**) apresentaram um ajuste perfeito somente em  
 1439 6,8 m de profundidade e no fundo da coluna de água, porém tendo uma diferença  
 1440 máxima entre os dois de apenas  $\sim 0,02 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  na superfície. Abaixo de 6,8 m de  
 1441 profundidade, a discrepância máxima entre os perfis ocorre em 9,8 m e apresenta  
 1442 um valor próximo à  $0,01 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Os índices RMAE e RMSE desta simulação foram  
 1443 iguais à 0,078 e 0,014, se enquadrando na qualificação descrita como “excelente” e  
 1444 representando apenas 8 ‰ do *range* total dos dados de velocidade, respectivamente.

1445 A **Tabela 11** apresenta os parâmetros livres e experimentais utilizados nas  
 1446 simulações para resultar no valor Skill = 0,99. O valor do componente do gradi-

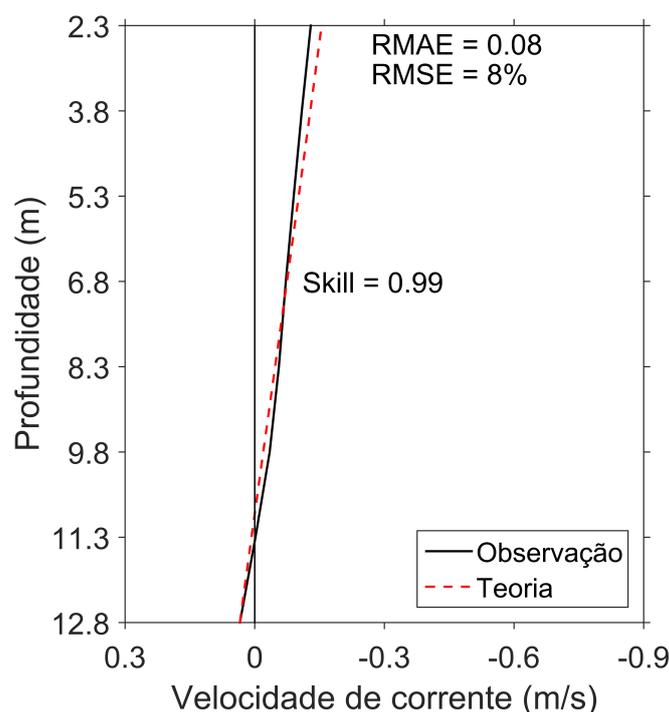


Figura 64: Perfil estacionário do componente de velocidade  $v$  observado (Observação) e simulado através da solução hidrodinâmica com atrito moderado (Teoria). Skill = 1 indica um ajuste perfeito entre valores observados e simulados. Perfil referente ao ciclo de enchente-vazante de 7 a 12 de janeiro de 2009. Valores  $v < 0$  e  $v > 0$  indicam movimentos de vazante e de enchente, respectivamente.

1447 ente longitudinal de densidade ( $\partial\bar{\rho}/\partial y$ ) foi o menor utilizado nas simulações deste  
 1448 trabalho, em concordância com o baixíssimo valor de  $\delta S$ . O valor de  $k$  foi uma  
 1449 ordem de grandeza menor do que seu valor constante ( $2,5 \times 10^{-3}$ ), similar ao ciclo  
 1450 de enchente-vazante anteriormente descrito. A baixa intensidade de  $v_f$  e o alto  
 1451 valor de  $\bar{s}$  também são próximos do ciclo anterior, visto que ambos apresentaram  
 1452 descargas fluviais menores do que  $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .  $\tau_{Wy}$  sendo positivo indica que a  
 1453 direção predominante do vento paralelo ao canal de acesso foi estuário acima, em  
 1454 concordância com os dados, em que a direção do vento esteve 69 % do tempo na  
 1455 direção estuário acima.

1456 A simulação do perfil médio de salinidade (**Fig. 65**) apresentou um Skill =

Tabela 11: Parâmetros livres e os obtidos através dos dados de campo (\*) utilizados nas simulações dos perfis estacionários do componente de velocidade  $v$  e de salinidade que resultaram no maior valor de Skill. Valores referentes ao ciclo de enchente-vazante de 7 a 12 de janeiro de 2009.

Parâmetros livres e experimentais	Valores numéricos
$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial y}$	$1 \times 10^{-4} \text{ kg.m}^{-4}$
$k$	$2,6 \times 10^{-4}$
$N_z$	$9 \times 10^{-4} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$
$K_z$	$1,3 \times 10^{-4} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$
$*v_f$	$-0,06 \text{ m.s}^{-1}$
$*\bar{s}$	$30,7 \text{ ‰}$
$*\tau_{Wy}$	$0,015 \text{ N.m}^{-2}$

1457 1 para o ajuste com os dados de campo de superfície e do fundo, reproduzindo  
 1458 satisfatoriamente a fraca estratificação vertical observada. O índice RMAE desta  
 1459 simulação foi bastante baixo ( $4,5 \times 10^{-4}$ ), classificando os resultados na faixa de  
 1460 qualificação “excelente”. O índice RMSE foi 0,027, também baixo quando situado  
 1461 na escala de variação total dos dados de salinidade, representando menos do que  
 1462 2 % desta variação.

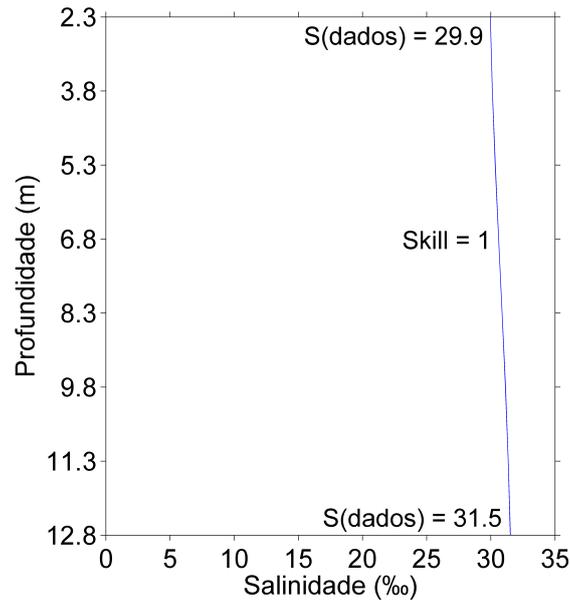


Figura 65: Perfil estacionário de salinidade simulado através da solução hidrodinâmica com atrito moderado. Skill = 1 indica um ajuste perfeito entre valores observados (“S(dados)”) e simulados na superfície e no fundo da coluna d’água. Perfil referente ao ciclo de enchente-vazante de 7 a 12 de janeiro de 2009.

1463 Segundo os valores limites de  $N_z$  e  $K_z$  das simulações deste ciclo (**Tab. 12**), o  
1464 limite inferior de  $N_z$  possui a mesma ordem de grandeza do valor deste coeficiente  
1465 que gerou o maior Skill (**Tab. 11**). O limite superior de  $N_z$  apresentou três ordens  
1466 de grandeza a mais, mesmo sem ter alcançado o valor de Skill igual a 0,50. O limite  
1467 inferior e superior de  $K_z$  apresentaram uma ordem de grandeza menor e a mesma  
1468 grandeza, respectivamente, do valor da **Tabela 11**.

Tabela 12: Limites superiores e inferiores dos coeficientes  $N_z$  e  $K_z$  correspondentes a um valor de Skill igual à 0,50, mantendo fixo os valores de  $K_z$  e  $N_z$ , respectivamente, pertencentes à Tabela 11. Limites referentes ao ciclo de enchente-vazante de 7 a 12 de janeiro de 2009.

	Limite Inferior	Limite Superior
$N_z$	$1,5 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$*1,5 \times 10^{-1} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
$K_z$	$2,1 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$7,5 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

\* : Mínimo valor de Skill alcançado = 0,69.

## 1469 4.3.2. Descarga Fluvial Média

### 1470 4.3.2.1. Ciclo de Enchente-Vazante de 3 a 8 de abril de 2007

1471 Apesar do alto valor de  $\delta S$  (18,4 ‰) deste ciclo, que é maior do que 5 ‰ e o  
 1472 classifica como estuário tipo parcialmente misturado com forte estratificação ver-  
 1473 tical, a simulação mais próxima do perfil observado foi obtida a partir da Equação  
 1474 3.19a (atrito moderado), resultando em um Skill igual à 0,98 (**Fig. 66**). Os perfis  
 1475 médios observados e simulados são muito próximos da superfície, a 5,3 m de pro-  
 1476 fundidade, apresentando uma diferença menor do que  $0,01 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Entre 5,3 e 9,8  
 1477 m de profundidade, a diferença entre os perfis também não é muito significativa,  
 1478 resultando em um valor máximo de  $\sim 0,02 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . As maiores diferenças são encon-  
 1479 tradas próximo ao fundo, apresentando valores  $< 0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Os índices RMAE e  
 1480 RMSE calculados foram iguais à 0,012 e 0,038, o que indica que esta simulação foi  
 1481 classificada como “excelente” e seu erro representa 9 % da variação total dos dados  
 1482 de velocidade, respectivamente.

1483 Para reproduzir os perfis estacionários de velocidade e de salinidade, foram  
 1484 utilizados os parâmetros livres e experimentais da **Tabela 13** para resultar no  
 1485 maior valor de Skill possível. O valor do componente do gradiente longitudinal

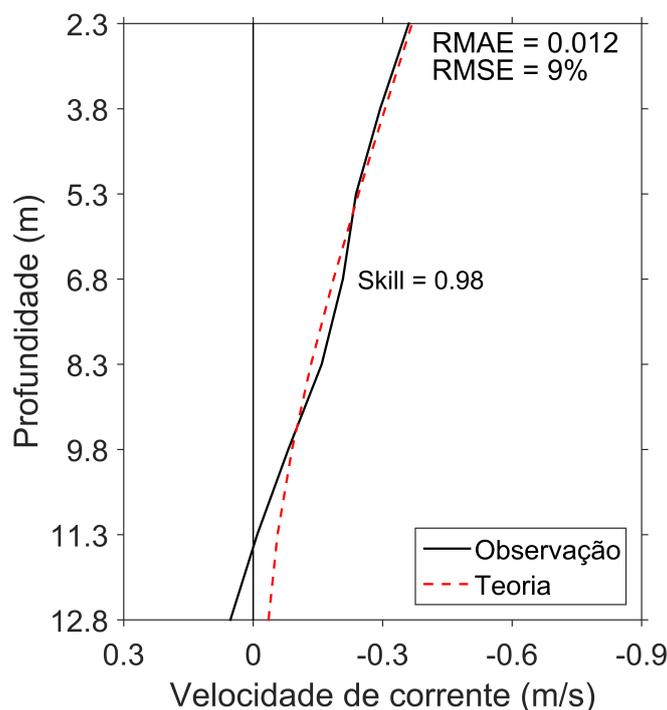


Figura 66: Perfil estacionário do componente de velocidade  $v$  observado (Observação) e simulado através da solução hidrodinâmica com atrito moderado (Teoria). Skill = 1 indica um ajuste perfeito entre valores observados e simulados. Perfil referente ao ciclo de enchente-vazante de 3 a 8 de abril de 2007. Valores  $v < 0$  e  $v > 0$  indicam movimentos de vazante e de enchente, respectivamente.

1486 de densidade ( $\partial\bar{\rho}/\partial y$ ) foi o menor utilizado, apesar do alto  $\delta S$ . O valor de  $k$   
 1487 apresentou uma ordem de grandeza menor do que o seu valor constante de  $2,5 \times 10^{-3}$ .  
 1488 A intensidade de  $v_f$  foi intermediária conforme a moderada descarga fluvial, mas  
 1489 o valor de  $\bar{s}$  foi relativamente alto para tal vazão. A magnitude de  $\tau_{W_y}$  desta  
 1490 simulação foi a mais baixa dentre os ciclos de enchente-vazante descritos, sendo  
 1491 que seu valor negativo indica que a direção predominante do vento foi estuário  
 1492 abaixo. Se observou nos dados um balanço entre a atuação das direções do vento  
 1493 neste ciclo, com porcentagens de 54 % e 46 %, aproximadamente, soprando nas  
 1494 direções estuário acima e abaixo, respectivamente.

1495 O ajuste entre os dados de salinidade na superfície e no fundo com a simulação

Tabela 13: Parâmetros livres e os obtidos através dos dados de campo (\*) utilizados nas simulações dos perfis estacionários do componente de velocidade  $v$  e de salinidade que resultaram no maior valor de Skill. Valores referentes ao ciclo de enchente-vazante de 3 a 8 de abril de 2007.

Parâmetros livres e experimentais	Valores numéricos
$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial y}$	$1 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^{-4}$
$k$	$2,2 \times 10^{-4}$
$N_z$	$7,6 \times 10^{-4} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$
$K_z$	$5,1 \times 10^{-4} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$
$*v_f$	$-0,19 \text{ m.s}^{-1}$
$*\bar{s}$	$22,9 \text{ ‰}$
$*\tau_{Wy}$	$-0,0061 \text{ N.m}^{-2}$

1496 do perfil médio de salinidade (**Fig. 67**) foi perfeita, apresentando um valor de  
 1497 Skill igual a 1, reproduzindo a forte estratificação vertical apesar do baixo valor de  
 1498  $\partial \bar{\rho} / \partial y$  utilizado. Os índices RMAE e RMSE da simulação do perfil de salinidade  
 1499 foram iguais à 0,0033 e 0,081, se enquadrando na classificação denominada “ex-  
 1500 celente” e representando apenas 0,4 ‰ da variação total dos dados de salinidade,  
 1501 respectivamente.

1502 Os limites inferior e superior de  $N_z$  (**Tab. 14**) das simulações deste ciclo de  
 1503 enchente-vazante são uma ordem de grandeza menor e duas maior, respectiva-  
 1504 mente, comparados ao valor de  $N_z$  que resultou no maior Skill (**Tab. 13**). É  
 1505 importante ressaltar que o limite superior de  $N_z$  foi alto mesmo considerando que  
 1506 o valor de Skill de 0,50 não foi alcançado. Os limites inferior e superior de  $K_z$   
 1507 foram uma ordem de grandeza menor e uma ordem maior, respectivamente, do

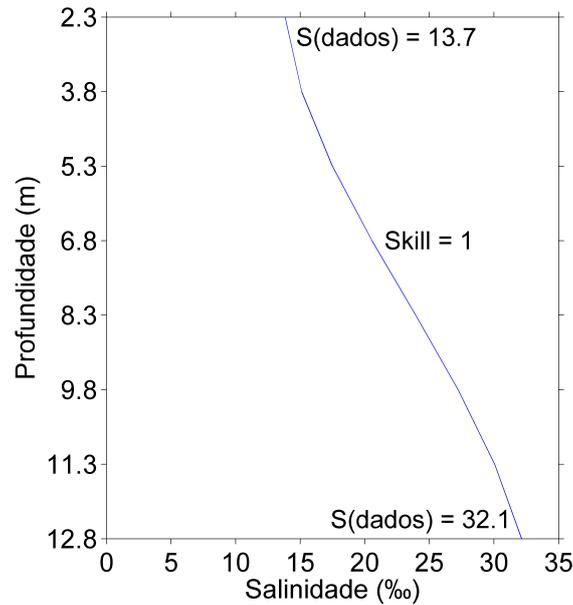


Figura 67: Perfil estacionário de salinidade simulado através da solução hidrodinâmica com atrito moderado. Skill = 1 indica um ajuste perfeito entre valores observados (“S(dados)”) e simulados na superfície e no fundo da coluna d’água. Perfil referente ao ciclo de enchente-vazante de 3 a 8 de abril de 2007.

1508 que o valor apresentado na **Tabela 13**.

Tabela 14: Limites superiores e inferiores dos coeficientes  $N_z$  e  $K_z$  correspondentes a um valor de Skill igual à 0,50, mantendo fixo os valores de  $K_z$  e  $N_z$ , respectivamente, pertencentes à Tabela 13. Limites referentes ao ciclo de enchente-vazante de 3 a 8 de abril de 2007.

	Limite Inferior	Limite Superior
$N_z$	$6,8 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$*9,3 \times 10^{-2} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
$K_z$	$8,6 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$3,0 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

\* : Mínimo valor de Skill alcançado = 0,76.

#### 1509 4.3.2.2. Ciclo de Enchente-Vazante de 12 a 17 de agosto de 2008

1510 Apesar deste ciclo ter apresentado um  $\delta S$  maior do que 5 ‰ (7,5 ‰), a si-  
1511 mulação feita com a Equação 3.19a, que considera um atrito moderado no fundo,  
1512 reproduziu um resultado um pouco mais próximo do perfil observado, apresentando  
1513 um Skill igual à 0,67 (**Fig. 68**). Os perfis observado e simulado do componente  
1514 de velocidade  $v$  são bastante diferentes como indicado pelo valor intermediário  
1515 de Skill, apresentando curvaturas opostas. A menor diferença entre os perfis é  
1516 observada na superfície ( $< 0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), crescendo de forma linear até a máxima  
1517 discrepância de  $\sim 0,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  em 9,8 m de profundidade, permanecendo no entorno  
1518 deste valor até o fundo da coluna de água. O índice RMAE deste perfil foi 0,43,  
1519 enquadrando-se na faixa de qualificação “razoável”. O índice RMSE possui um  
1520 valor de 0,29, bastante alto visto que representa mais da metade da variação total  
1521 dos dados de velocidade (60 %).

1522 As simulações dos perfis de velocidade e salinidade foram feitas utilizando os  
1523 parâmetros livres e experimentais da **Tabela 15** para resultar no máximo valor  
1524 de Skill. O valor do componente do gradiente longitudinal de densidade,  $\partial\bar{\rho}/\partial y$ ,  
1525 foi o mais alto utilizado neste trabalho, apesar do  $\delta S$  deste ciclo ser intermediário.  
1526 O valor de  $k$  foi uma ordem de grandeza menor do que o valor constante de  
1527  $2,5 \times 10^{-3}$ . Tanto o valor intermediário de  $v_f$  — similar ao ciclo anterior —, quanto  
1528 o baixo valor de  $\bar{s}$  foram compatíveis com a moderada descarga fluvial ( $1.779$   
1529  $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ).  $\tau_{W_y}$  sendo negativo indica que a direção predominante do vento paralelo  
1530 ao canal de acesso foi no sentido estuário abaixo, concordando com a porcentagem  
1531 de ocorrência desta direção de acordo com os dados, que foi de aproximadamente  
1532 57 %.

1533 O perfil médio de salinidade simulado (**Fig. 69**) apresentou valor de Skill  
1534 igual a 1, o que caracteriza a reprodução dos dados observados na superfície e no  
1535 fundo como um ajuste perfeito. Os valores dos índices RMAE e RMSE calculados

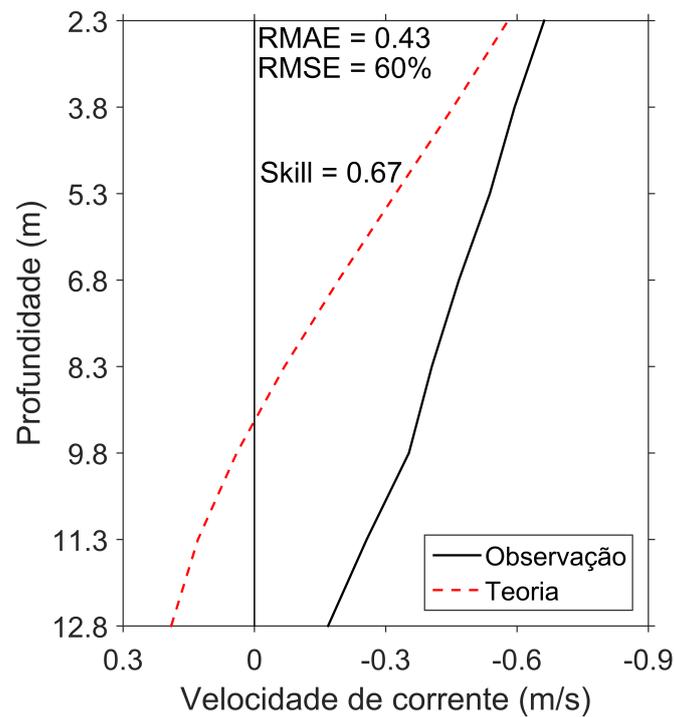


Figura 68: Perfil estacionário do componente de velocidade  $v$  observado (Observação) e simulado através da solução hidrodinâmica com atrito moderado (Teoria). Skill = 1 indica um ajuste perfeito entre valores observados e simulados. Perfil referente ao ciclo de enchente-vazante de 12 a 17 de agosto de 2008. Valores  $v < 0$  e  $v > 0$  indicam movimentos de vazante e de enchente, respectivamente.

1536 para este perfil foram iguais a 0,0028 e 0,34, classificando a qualidade dos resulta-  
1537 dos como “excelente” e representando apenas 4 % da variação total dos dados de  
1538 salinidade, respectivamente.

Tabela 15: Parâmetros livres e os obtidos através dos dados de campo (\*) utilizados nas simulações dos perfis estacionários do componente de velocidade  $v$  e de salinidade que resultaram no maior valor de Skill. Valores referentes ao ciclo de enchente-vazante de 12 a 17 de agosto de 2008.

Parâmetros livres e experimentais	Valores numéricos
$\frac{\partial \bar{p}}{\partial y}$	$5 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^{-4}$
$k$	$3,8 \times 10^{-4}$
$N_z$	$1,3 \times 10^{-3} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$
$K_z$	$1,1 \times 10^{-2} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$
$*v_f$	$-0.18 \text{ m.s}^{-1}$
$*\bar{s}$	$8,5 \text{ ‰}$
$*\tau_{Wy}$	$-0.013 \text{ N.m}^{-2}$

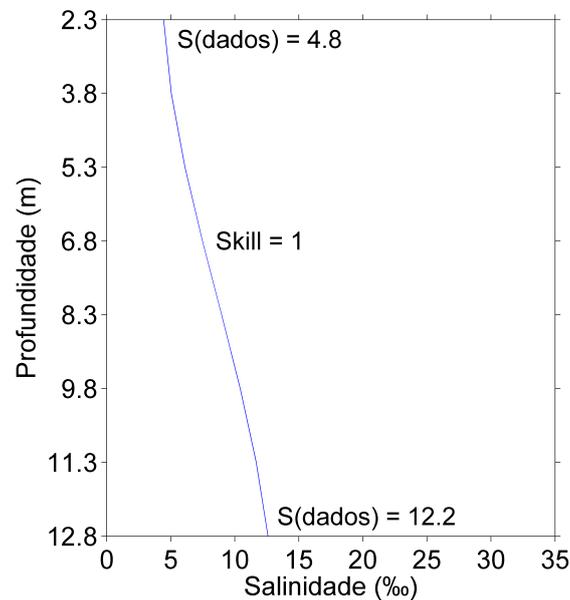


Figura 69: Perfil estacionário de salinidade simulado através da solução hidrodinâmica com atrito moderado. Skill = 1 indica um ajuste perfeito entre valores observados (“S(dados)”) e simulados na superfície e no fundo da coluna d’água. Perfil referente ao ciclo de enchente-vazante de 12 a 17 de agosto de 2008.

Os limites inferiores de  $N_z$  e  $K_z$  para a reprodução dos dados observados durante este ciclo (**Tab. 16**) apresentaram uma ordem de grandeza menor do que os respectivos valores da **Tabela 15**; já os limites superiores de  $N_z$  e  $K_z$  foram uma ordem de grandeza maior e mesma ordem, respectivamente, dos valores destes coeficientes que resultaram no maior valor de Skill (**Tab. 15**).

Tabela 16: Limites superiores e inferiores dos coeficientes  $N_z$  e  $K_z$  correspondentes a um valor de Skill igual à 0,50, mantendo fixo os valores de  $K_z$  e  $N_z$ , respectivamente, pertencentes à Tabela 15. Limites referentes ao ciclo de enchente-vazante de 12 a 17 de agosto de 2008.

	Limite Inferior	Limite Superior
$N_z$	$3,8 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$*7,8 \times 10^{-2} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
$K_z$	$2,1 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$7,3 \times 10^{-2} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

\* : Mínimo valor de Skill alcançado = 0,51.

#### 4.3.2.3. Ciclo de Enchente-Vazante de 14 a 22 de novembro de 2011

Apesar da simulação feita a partir da Equação 3.17a ter gerado um valor de Skill satisfatório (Skill = 0,90), a simulação utilizando a Equação 3.19a obteve melhores resultados, apresentando um valor de Skill igual a 0,99 (**Fig. 70**). O perfil simulado resultou em um ajuste perfeito com o observado em 5,3 m de profundidade e abaixo de 11,3 m. A diferença máxima entre os dois perfis ( $\sim 0,05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) é encontrada na superfície, diminuindo linearmente até 5,3 m de profundidade. Entre 5,3 e 11,3 m de profundidade, a diferença entre os perfis foi em média  $0,02 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . O valores dos índices RMAE e RMSE para esta simulação foram iguais à 0,011 e 0,029, enquadrando-se na qualificação intitulada como “excelente” e representando apenas 9 % da variação total dos dados de velocidade, respectivamente.

Os parâmetros livres e experimentais utilizados nas simulações deste ciclo para

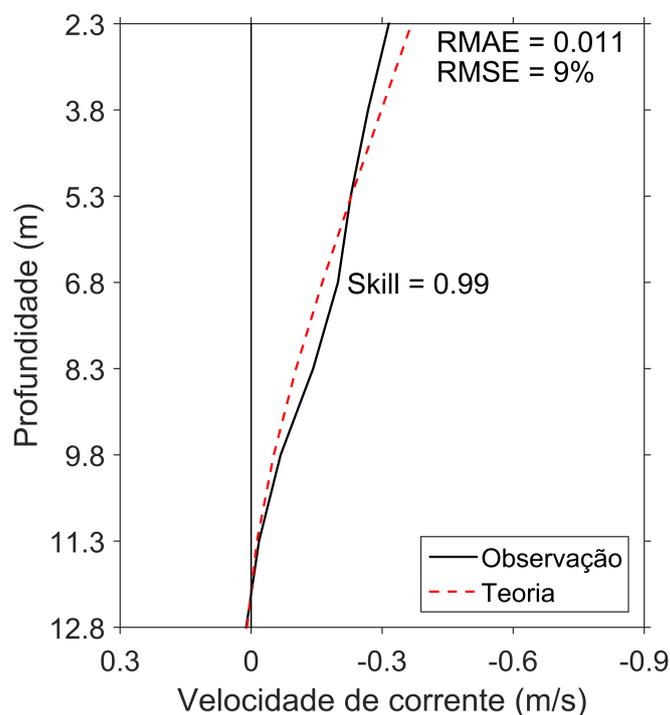


Figura 70: Perfil estacionário do componente de velocidade  $v$  observado (Observação) e simulado através da solução hidrodinâmica com atrito moderado (Teoria). Skill = 1 indica um ajuste perfeito entre valores observados e simulados. Perfil referente ao ciclo de enchente-vazante de 14 a 22 de novembro de 2011. Valores  $v < 0$  e  $v > 0$  indicam movimentos de vazante e de enchente, respectivamente.

1556 gerar o maior valor de Skill são apresentados na **Tabela 17**. O valor do compo-  
 1557 nente do gradiente longitudinal de densidade ( $\partial\bar{\rho}/\partial y$ ) foi o maior utilizado, apesar  
 1558 da diferença de salinidade entre a superfície e o fundo (9,4 ‰) ser intermediária. O  
 1559 valor de  $k$  foi uma ordem de grandeza menor do que o valor constante de  $2,5 \times 10^{-3}$ .  
 1560 A magnitude de  $v_f$  foi um pouco menor do que a dos outros ciclos com descarga  
 1561 fluvial média, mas ainda considerada razoável devido à intensidade da vazão. O  
 1562 valor de  $\bar{s}$  foi moderado, também em concordância com a descarga fluvial. A in-  
 1563 tensidade de  $\tau_{Wy}$  foi a maior dentre os ciclos de enchente-vazante já descritos e seu  
 1564 sentido indica a predominância de ventos na direção estuário abaixo, de acordo  
 1565 com a porcentagem de ocorrência dos dados nesta direção (67 %).

Tabela 17: Parâmetros livres e os obtidos através dos dados de campo (\*) utilizados nas simulações dos perfis estacionários do componente de velocidade  $v$  e de salinidade que resultaram no maior valor de Skill. Valores referentes ao ciclo de enchente-vazante de 14 a 22 de novembro de 2011.

Parâmetros livres e experimentais	Valores numéricos
$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial y}$	$5 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^{-4}$
$k$	$7,9 \times 10^{-4}$
$N_z$	$2,7 \times 10^{-3} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$
$K_z$	$5,8 \times 10^{-3} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$
$*v_f$	$-0.16 \text{ m.s}^{-1}$
$*\bar{s}$	$13,4 \text{ ‰}$
$*\tau_{Wy}$	$-0,035 \text{ N.m}^{-2}$

1566 O perfil estacionário de salinidade simulado (**Fig. 71**) apresentou ajuste per-  
 1567 feito (Skill = 1) com os dados na superfície e no fundo da coluna de água, além  
 1568 de satisfatoriamente reproduzir a intermediária estratificação vertical apesar do  
 1569 alto valor de  $\partial \bar{\rho} / \partial y$  utilizado. O valor do índice RMAE deste perfil foi igual a  
 1570 0,0011, pertencendo à faixa de classificação dos resultados denominada como “ex-  
 1571 celente”. O índice RMSE apresentou um valor de 0,015, o menor de todos os perfis  
 1572 de salinidade simulados por representar menos do que 0,2 % da variação total dos  
 1573 dados.

1574 Os limites inferiores e superiores de  $N_z$  e  $K_z$  para as simulações destes perfis  
 1575 são apresentados na **Tabela 18** e comparados aos valores destes coeficientes que  
 1576 resultaram no maior Skill (**Tab. 17**). Os limites inferior e superior de  $N_z$  foram  
 1577 uma ordem de grandeza menor e duas maior, respectivamente, do que os valores

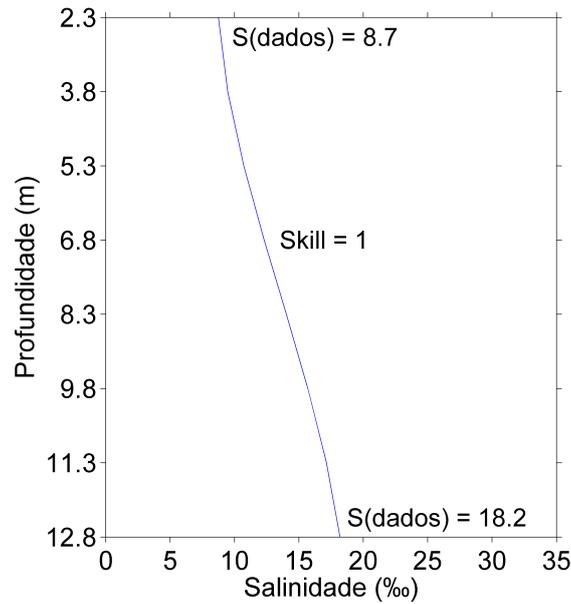


Figura 71: Perfil estacionário de salinidade simulado através da solução hidrodinâmica com atrito moderado. Skill = 1 indica um ajuste perfeito entre valores observados (“S(dados)”) e simulados na superfície e no fundo da coluna d’água. Perfil referente ao ciclo de enchente-vazante de 14 a 22 de novembro de 2011.

1578 da **Tabela 17**. Em relação ao coeficiente  $K_z$ , os limites inferior e superior apre-  
 1579 sentaram uma ordem de grandeza menor e uma maior, respectivamente, do que o  
 1580 valor que gerou o maior Skill.

Tabela 18: Limites superiores e inferiores dos coeficientes  $N_z$  e  $K_z$  correspondentes a um valor de Skill igual à 0,50, mantendo fixo os valores de  $K_z$  e  $N_z$ , respectivamente, pertencentes à Tabela 17. Limites referentes ao ciclo de enchente-vazante de 14 a 22 de novembro de 2011.

	Limite Inferior	Limite Superior
$N_z$	$3,9 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$*2,2 \times 10^{-1} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
$K_z$	$9,8 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$3,4 \times 10^{-2} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

\* : Mínimo valor de Skill alcançado = 0,79.

### 1581 4.3.3. Descarga Fluvial Alta

#### 1582 4.3.3.1. Ciclo de Enchente-Vazante de 9 a 14 de outubro de 2005

1583 Devido ao baixo valor de  $\delta S$  (2,1 ‰), as simulações dos perfis estacionários fo-  
1584 ram feitas a partir da Equação 3.19a, resultando em um valor de Skill intermediário  
1585 que foi igual a 0,72 (**Fig. 72**). Os perfis observado e simulado possuem curvaturas  
1586 opostas similar ao perfil de velocidade mostrado na **Figura 68**, com a menor e a  
1587 maior diferença entre os perfis sendo observada na superfície ( $\sim 0,03 \text{ m.s}^{-1}$ ) e em  
1588 8,3 m de profundidade ( $\sim 0,2 \text{ m.s}^{-1}$ ), respectivamente. A diferença entre os perfis  
1589 volta a ser menor em direção ao fundo da coluna d'água, diminuindo para aproxi-  
1590 madamente  $0,13 \text{ m.s}^{-1}$  em 12,8 m de profundidade. O valor do índice RMAE desta  
1591 simulação foi 0,29, pertencendo à faixa de qualidade classificada como “bom”. O  
1592 valor do índice RMSE (0,17) foi alto conforme perfil de velocidade da **Figura 68**,  
1593 também representando uma porcentagem próxima à metade da variação total dos  
1594 dados de velocidade (47 ‰).

1595 Os parâmetros livres e experimentais utilizados nas simulações deste ciclo são  
1596 apresentados na **Tabela 19**. O valor do componente do gradiente longitudinal  
1597 de densidade,  $\partial \bar{\rho} / \partial y$ , foi o maior utilizado, apesar do baixo valor de  $\delta S$ . O valor  
1598 de  $k$  deste ciclo foi o único que se aproximou do valor constante de  $2,5 \times 10^{-3}$  em  
1599 vez de apresentar uma ordem de grandeza menor. A alta intensidade de  $v_f$  —  
1600 a maior dentre todos os ciclos descritos — e o baixíssimo valor de  $\bar{s}$  estão em  
1601 concordância com a mais alta descarga fluvial ( $3.902 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) observada nos ciclos  
1602 de enchente-vazante. O valor positivo de  $\tau_{Wy}$  indica que o vento predominante  
1603 que estava atuando durante este ciclo era no sentido estuário acima, conforme o  
1604 observado nos dados de campo, com uma porcentagem de ocorrência desta direção  
1605 no entorno de 70 ‰ dos casos.

1606 O perfil médio de salinidade simulado (**Fig. 73**) apresentou o valor máximo

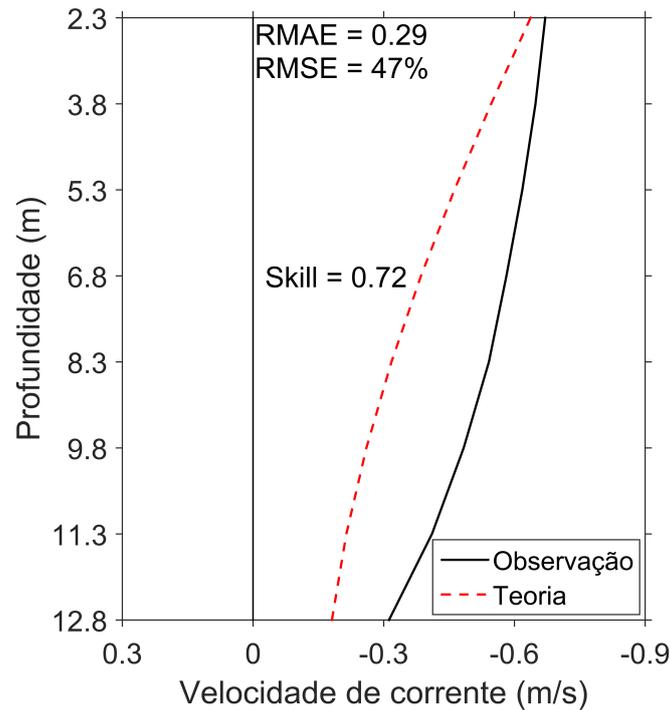


Figura 72: Perfil estacionário do componente de velocidade  $v$  observado (Observação) e simulado através da solução hidrodinâmica com atrito moderado (Teoria). Skill = 1 indica um ajuste perfeito entre valores observados e simulados. Perfil referente ao ciclo de enchente-vazante de 9 a 14 de outubro de 2005. Valores  $v < 0$  e  $v > 0$  indicam movimentos de vazante e de enchente, respectivamente.

1607 de Skill (igual a 1), o que indica um ajuste perfeito com os dados na superfície e  
 1608 no fundo e reproduzindo a quase inexistente estratificação vertical mesmo com o  
 1609 alto valor de  $\partial\bar{\rho}/\partial y$  utilizado. Os índices RMAE e RMSE deste perfil foram iguais  
 1610 à 0,028 e 0,12, classificando a qualidade dos resultados como “excelente” e repre-  
 1611 sentando apenas 5 % da variação total dos dados de salinidade, respectivamente.

Tabela 19: Parâmetros livres e os obtidos através dos dados de campo (\*) utilizados nas simulações dos perfis estacionários do componente de velocidade  $v$  e de salinidade que resultaram no maior valor de Skill. Valores referentes ao ciclo de enchente-vazante de 9 a 14 de outubro de 2005.

Parâmetros livres e experimentais	Valores numéricos
$\frac{\partial \bar{p}}{\partial y}$	$5 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^{-4}$
$k$	$1,9 \times 10^{-3}$
$N_z$	$6,7 \times 10^{-3} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$
$K_z$	$2,1 \times 10^{-2} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$
* $v_f$	$-0,39 \text{ m.s}^{-1}$
* $\bar{s}$	$2,7 \text{ ‰}$
* $\tau_{Wy}$	$0,014 \text{ N.m}^{-2}$

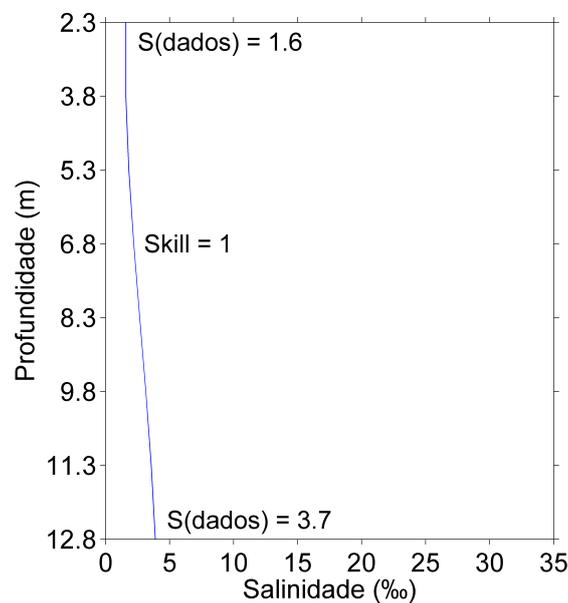


Figura 73: Perfil estacionário de salinidade simulado através da solução hidrodinâmica com atrito moderado. Skill = 1 indica um ajuste perfeito entre valores observados (“S(dados)”) e simulados na superfície e no fundo da coluna d’água. Perfil referente ao ciclo de enchente-vazante de 9 a 14 de outubro de 2005.

1612 Segundo os valores limites de  $N_z$  e  $K_z$  das simulações deste ciclo (**Tab. 20**),  
 1613 os limites inferior e superior de  $N_z$  possuem uma ordem de grandeza menor e duas  
 1614 maior, respectivamente, do que o valor deste coeficiente que gerou o maior Skill  
 1615 (**Tab. 19**). Os limites inferior e superior de  $K_z$  apresentaram uma ordem de  
 1616 grandeza menor e uma ordem maior, respectivamente, do que o valor da **Tabela**  
 1617 **19**.

Tabela 20: Limites superiores e inferiores dos coeficientes  $N_z$  e  $K_z$  correspondentes a um valor de Skill igual à 0,50, mantendo fixo os valores de  $K_z$  e  $N_z$ , respectivamente, pertencentes à Tabela 19. Limites referentes ao ciclo de enchente-vazante de 9 a 14 de outubro de 2005.

	Limite Inferior	Limite Superior
$N_z$	$6,9 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$*1,4 \times 10^{-1} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
$K_z$	$3,9 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$1,3 \times 10^{-1} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

\* : Mínimo valor de Skill alcançado = 0,67.

#### 1618 4.3.3.2. Ciclo de Enchente-Vazante de 19 a 24 de agosto de 2010

1619 Conforme o ciclo anterior de descarga fluvial alta, as simulações foram feitas  
 1620 a partir da Equação 3.19a devido à seu baixo valor de  $\delta S$  (4,6 ‰), porém resul-  
 1621 tando em um valor de Skill mais satisfatório (igual a 0,92). O ajuste entre os perfis  
 1622 simulado e observado (**Fig. 74**) apresentou uma diferença máxima de aproxima-  
 1623 damente  $0,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  encontrada na superfície, diminuindo para zero em 6,8 m de  
 1624 profundidade. Entre esta profundidade e 9,8 m, a diferença entre os dois perfis foi  
 1625 pequena, não chegando a  $0,05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Em direção ao fundo da coluna de água, esta  
 1626 diferença volta a aumentar de forma linear e atinge o valor de  $\sim 0,13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  em 12,8  
 1627 m de profundidade, não reproduzindo as baixas intensidades de velocidade de en-  
 1628 chente observadas no fundo. Os índices RMAE e RMSE calculados para este perfil

1629 foram iguais a 0,25 e 0,11, pertencendo à faixa de qualificação denominada “bom”  
 1630 e razoavelmente representando 22 % da variação total dos dados de velocidade,  
 1631 respectivamente.

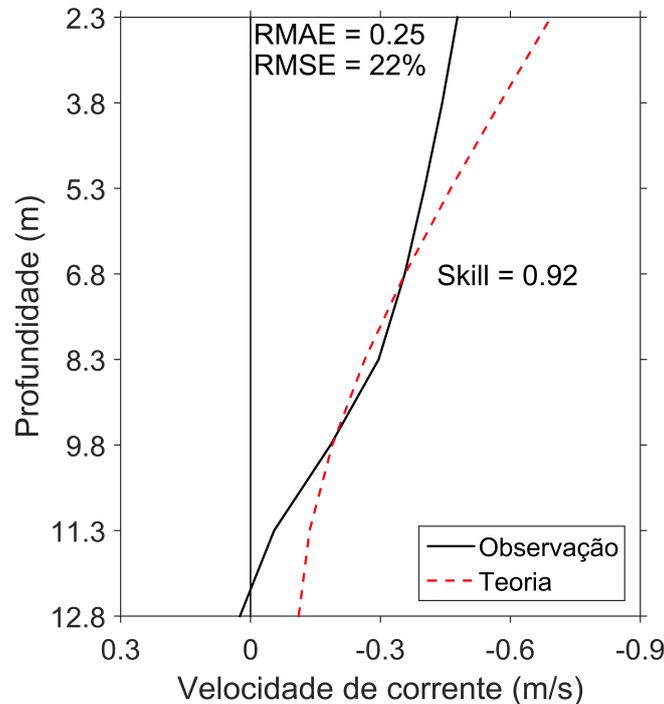


Figura 74: Perfil estacionário do componente de velocidade  $v$  observado (Observação) e simulado através da solução hidrodinâmica com atrito moderado (Teoria). Skill = 1 indica um ajuste perfeito entre valores observados e simulados. Perfil referente ao ciclo de enchente-vazante de 19 a 24 de agosto de 2010. Valores  $v < 0$  e  $v > 0$  indicam movimentos de vazante e de enchente, respectivamente.

1632 Com o intuito de reproduzir os perfis estacionários de velocidade e de salinidade  
 1633 observados e atingir o maior valor possível de Skill, foram utilizados os parâme-  
 1634 tros livres e experimentais da **Tabela 21**. O valor do componente do gradiente  
 1635 longitudinal de densidade,  $\partial\bar{\rho}/\partial y$ , foi bastante baixo de acordo com o valor de  $\delta S$   
 1636 deste ciclo. O valor de  $k$  apresentou uma ordem de grandeza menor do que o valor  
 1637 constante de  $2,5 \times 10^{-3}$  conforme a maioria dos ciclos de enchente-vazante descritos.  
 1638 A alta intensidade de  $v_f$  e o baixo valor de  $\bar{s}$  foram similares ao ciclo anterior

1639 por apresentar uma descarga fluvial próxima à deste ciclo ( $3.754 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ). O valor  
 1640 negativo de  $\tau_{Wy}$  indica que a direção predominante do vento paralelo ao canal de  
 1641 acesso foi estuário abaixo, em concordância com o observado em aproximadamente  
 1642 70 % dos casos.

Tabela 21: Parâmetros livres e os obtidos através dos dados de campo (\*) utilizados nas simulações dos perfis estacionários do componente de velocidade  $v$  e de salinidade que resultaram no maior valor de Skill. Valores referentes ao ciclo de enchente-vazante de 19 a 24 de agosto de 2010.

Parâmetros livres e experimentais	Valores numéricos
$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial y}$	$1,7 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-4}$
$k$	$1,8 \times 10^{-4}$
$N_z$	$6,2 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
$K_z$	$5,7 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
* $v_f$	$-0.37 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
* $\bar{s}$	$2,6 \text{ ‰}$
* $\tau_{Wy}$	$-0.019 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$

1643 O ajuste entre os dados de salinidade na superfície e no fundo com o respectivo  
 1644 perfil médio simulado (**Fig. 75**) foi perfeito, apresentando um valor de Skill  
 1645 igual à 1 e forma muito similar ao perfil do ciclo anterior. Os índices RMAE e  
 1646 RMSE desta simulação foram iguais à 0,05 e 0,15, se enquadrando na classificação  
 1647 denominada como “excelente” e representando apenas 3 % da variação total dos  
 1648 dados de salinidade, respectivamente.

1649 Os valores limites dos coeficientes  $N_z$  e  $K_z$  para a reprodução dos dados ob-  
 1650 servados durante este ciclo são apresentados na **Tabela 22**. Os limites inferior

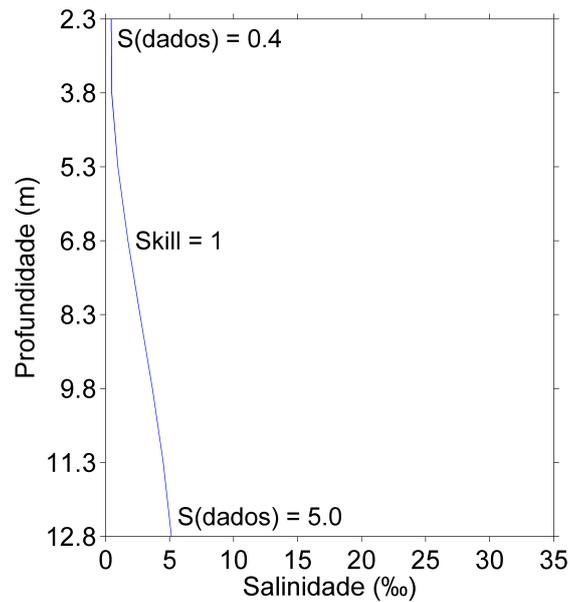


Figura 75: Perfil estacionário de salinidade simulado através da solução hidrodinâmica com atrito moderado. Skill = 1 indica um ajuste perfeito entre valores observados (“S(dados)”) e simulados na superfície e no fundo da coluna d’água. Perfil referente ao ciclo de enchente-vazante de 19 a 24 de agosto de 2010.

1651 e superior de  $N_z$  foram uma ordem de grandeza menor e duas maior, respectiva-  
1652 mente, do que o valor deste coeficiente que resultou no maior Skill (**Tab. 21**).  
1653 Já os limites inferior e superior de  $K_z$  apresentaram praticamente mesma ordem  
1654 de grandeza e uma ordem maior, respectivamente, do que o valor apresentado na  
1655 **Tabela 21**.

Tabela 22: Limites superiores e inferiores dos coeficientes  $N_z$  e  $K_z$  correspondentes a um valor de Skill igual à 0,50, mantendo fixo os valores de  $K_z$  e  $N_z$ , respectivamente, pertencentes à Tabela 21. Limites referentes ao ciclo de enchente-vazante de 19 a 24 de agosto de 2010.

	Limite Inferior	Limite Superior
$N_z$	$7,5 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$*3,4 \times 10^{-2} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
$K_z$	$9,9 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$3,4 \times 10^{-2} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

\* : Mínimo valor de Skill alcançado = 0,79.

#### 1656 4.3.4. Forçantes dos Perfis Estacionários de Velocidade e Sa- 1657 linidade

1658 As magnitudes das forçantes nos perfis do componente de velocidade  $v$  e de  
1659 salinidade  $S$  são apresentadas nas **Tabelas 23** e **24**. No ano de 2006 (**Tab. 23**), a  
1660 forçante que apresentou a maior magnitude no perfil de velocidade foi o gradiente  
1661 longitudinal de densidade, sendo importante ressaltar que a descarga fluvial e a  
1662 tensão de cisalhamento do vento – tanto na coluna d’água como um todo, quanto  
1663 na superfície – possuem a mesma ordem de grandeza. No perfil de salinidade,  
1664 a magnitude da descarga fluvial foi maior do que a das demais forçantes, com o  
1665 gradiente longitudinal de densidade possuindo uma ordem de grandeza menor. A  
1666 tensão de cisalhamento do vento apresentou ordem de grandeza sete vezes menor  
1667 do que a da descarga fluvial, podendo ser desconsiderada no perfil de salinidade.

Tabela 23: Magnitudes médias das forçantes gradiente longitudinal de densidade ( $\partial\bar{\rho}/\partial y$ ), descarga fluvial ( $v_f$ ) e tensão de cisalhamento do vento ( $\tau_{W_y}$ ) nos perfis estacionários do componente de velocidade  $v$  e de salinidade, correspondentes aos anos de 2006, 2009, 2007, 2008 e 2011.

	Magnitudes									
	Baixa $Q$					Média $Q$				
	2006		2009			2007		2008		2011
$\frac{\partial\bar{\rho}}{\partial y}$	$O(10^{-1})$	$O(10^{-3})$	$O(10^{-3})$	$O(10^{-2})$	$O(10^{-2})$	$O(10^{-1})$	$O(10^{-1})$	$O(10^{-1})$	$O(10^{-1})$	$O(10^{-1})$
$v_f$	$O(10^{-2})$	$O(10^{-2})$	$O(10^{-2})$	$O(10^{-2})$	$O(10^{-1})$	$O(10^{-1})$	$O(10^{-1})$	$O(10^{-1})$	$O(10^{-1})$	$O(10^{-1})$
$\tau_{W_y}$ (coluna)	$O(10^{-2})$	$O(10^{-9})$	$O(10^{-2})$	$O(10^{-10})$	$O(10^{-2})$	$O(10^{-10})$	$O(10^{-2})$	$O(10^{-10})$	$O(10^{-2})$	$O(10^{-9})$
$\tau_{W_y}$ (superfície)	$O(10^{-2})$	---	$O(10^{-2})$	---	$O(10^{-2})$	---	$O(10^{-2})$	---	$O(10^{-2})$	---

Tabela 24: Magnitudes médias das forçantes gradiente longitudinal de densidade ( $\partial\bar{\rho}/\partial y$ ), descarga fluvial ( $v_f$ ) e tensão de cisalhamento do vento ( $\tau_{W_y}$ ) nos perfis estacionários do componente de velocidade  $v$  e de salinidade, correspondentes aos anos de 2005 e 2010.

Forçantes	Magnitudes			
	Alta $Q$			
	2005		2010	
	$v$	$S$	$v$	$S$
$\frac{\partial\bar{\rho}}{\partial y}$	$O(10^{-2})$	$O(10^{-2})$	$O(10^{-1})$	$O(10^{-1})$
$v_f$	$O(10^{-1})$	$O(10^{-1})$	$O(10^{-1})$	$O(10^{-1})$
$\tau_{W_y}$ (coluna)	$O(10^{-3})$	$O(10^{-9})$	$O(10^{-2})$	$O(10^{-10})$
$\tau_{W_y}$ (superfície)	$O(10^{-3})$	—	$O(10^{-1})$	—

1668 No ano de 2009 (**Tab. 23**), a tensão de cisalhamento do vento na superfície  
 1669 apresentou a maior magnitude para o perfil do componente de velocidade  $v$ ; en-  
 1670 tretanto, a descarga fluvial e a tensão de cisalhamento sobre toda coluna d'água  
 1671 possuem a mesma ordem de grandeza da tensão na superfície. O gradiente longi-  
 1672 tudinal de densidade foi a forçante que apresentou a menor magnitude neste perfil,  
 1673 sendo uma ordem de grandeza menor do que as demais. No perfil estacionário de  
 1674 salinidade, a maior magnitude pertenceu à descarga fluvial, que possui a mesma  
 1675 ordem de grandeza do que o gradiente longitudinal de densidade. Já a tensão de  
 1676 cisalhamento do vento possui uma magnitude desprezível, chegando a oito ordens  
 1677 de grandeza menor do que a da descarga fluvial.

1678 No ano de 2007 (**Tab. 23**), a forçante do perfil médio de velocidade que  
 1679 apresentou a maior magnitude foi a descarga fluvial, com as demais forçantes

1680 possuindo uma ordem de grandeza menor. No perfil de salinidade, a descarga  
1681 fluvial e o gradiente longitudinal de densidade apresentaram magnitudes muito  
1682 próximas, dominando este perfil. A magnitude da tensão de cisalhamento do  
1683 vento no perfil de salinidade pode ser desconsiderada, visto que apresentou nove  
1684 ordens de grandeza menor do que as outras duas forçantes.

1685 No ano de 2008 (**Tab. 23**), a magnitude do gradiente longitudinal de densidade  
1686 foi a maior tanto no perfil de velocidade, quanto no de salinidade, porém com a  
1687 descarga fluvial apresentando a mesma ordem de grandeza também nos dois perfis.  
1688 As magnitudes da tensão de cisalhamento do vento nos perfis de velocidade e de  
1689 salinidade foram uma e nove ordens de grandeza menor, respectivamente, do que  
1690 a das demais forçantes.

1691 Considerando as magnitudes das forçantes nos perfis estacionários para o ano  
1692 de 2011 (**Tab. 23**), houve um domínio da descarga fluvial e do gradiente longitu-  
1693 dinal de densidade tanto no perfil de velocidade, quanto no de salinidade. Apesar  
1694 da pequena diferença, pode-se dizer que a descarga fluvial apresentou a maior  
1695 magnitude no perfil de velocidade, enquanto que a magnitude do gradiente longi-  
1696 tudinal de densidade foi a maior no perfil de salinidade. As magnitudes da tensão  
1697 de cisalhamento do vento nos perfis de velocidade e salinidade foram uma e oito  
1698 ordens de grandeza menor, respectivamente, do que as outras duas forçantes.

1699 No ano de 2005 (**Tab. 24**), as magnitudes da descarga fluvial dominaram os  
1700 perfis de velocidade e de salinidade devido a sua altíssima intensidade durante  
1701 o ciclo, com o gradiente longitudinal de densidade apresentando uma ordem de  
1702 grandeza menor nos dois perfis. Já as magnitudes da tensão de cisalhamento do  
1703 vento nos perfis de velocidade e de salinidade foram duas e oito ordens de grandeza  
1704 menor, respectivamente, comparado à magnitude da descarga fluvial.

1705 No ano de 2010 (**Tab. 24**), a descarga fluvial apresentou a maior magnitude  
1706 para o perfil do componente de velocidade  $v$ , conforme o esperado; entretanto,

1707 o gradiente longitudinal de densidade e a tensão de cisalhamento do vento na  
1708 superfície também apresentaram a mesma ordem de grandeza. Já a magnitude da  
1709 tensão de cisalhamento sobre toda coluna d'água possui uma ordem de grandeza  
1710 menor do que as demais forçantes. Houve uma predominância das magnitudes do  
1711 gradiente longitudinal de densidade e da descarga fluvial sobre o perfil estacionário  
1712 de salinidade, em contrapartida que a magnitude da tensão de cisalhamento do  
1713 vento foi desprezível, chegando a nove ordens de grandeza menor do que a das  
1714 outras duas forçantes.

## 1715 Capítulo 5

# 1716 DISCUSSÃO

### 1717 5.1. Análises Hidrográficas

1718 Nos estudos de MÖLLER & CASTAING (1999) e MÖLLER *et al.* (2001), em  
1719 que a ação da descarga fluvial sobrepõe-se aos ventos de Sul (padrão 2) em vazões  
1720 maiores do que  $4.000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  — assim como o observado para o ano de 2007 —,  
1721 a zona de mistura manteve-se restrita à desembocadura ou foi expulsa por este  
1722 comportamento para a costa adjacente. O padrão 2 também foi constatado no  
1723 trabalho de MARQUES (2005), que utilizou uma série longa de descarga fluvial,  
1724 ventos, salinidade e nível da superfície livre para a Lagoa dos Patos. Segundo este  
1725 autor, o padrão 2 esteve presente entre os meses de junho a agosto, que é quando  
1726 a ação da descarga fluvial sobrepõe-se a dos ventos de S e ocorre a introdução de  
1727 águas com menor salinidade. Este período foi similar ao observado no presente  
1728 estudo apesar da série de dados ser bem menor, no geral com o padrão 2 cobrindo  
1729 o intervalo de tempo compreendido entre os meses de julho a setembro.

1730 A distribuição de frequência da descarga fluvial foi similar ao trabalho de VAZ  
1731 *et al.* (2006), que também utilizaram a soma das vazões dos rios Jacuí, Taquari  
1732 e Camaquã, mas contabilizando 57 anos de dados. Apesar deste estudo ter con-

1733 siderado diferentes faixas de descarga fluvial, mais de 80 % das ocorrências foram  
1734 correspondentes a vazões menores do que  $3.000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ , assim como no presente  
1735 trabalho. As médias mensais de descarga fluvial foram no geral maiores em VAZ  
1736 *et al.* (op. cit.) — com exceção dos meses de setembro e outubro — devido ao fato  
1737 de que grande proporção do período deste estudo esteve sob influência do fenômeno  
1738 La Niña (**Fig. 86**) ou foram anos classificados como neutros. No geral, somente  
1739 parte dos anos de 2005, 2009, 2010 e metade do ano de 2006 tiveram a ocorrência  
1740 do fenômeno El Niño. As médias mensais máxima e mínima observadas em VAZ *et*  
1741 *al.* (op. cit.) foram correspondentes aos meses de agosto ( $\sim 2.465 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ) e março  
1742 ( $\sim 797 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ), respectivamente, enquanto que neste trabalho elas foram observadas  
1743 em setembro ( $\sim 2.639 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ) e em dezembro ( $\sim 550 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ), respectivamente.

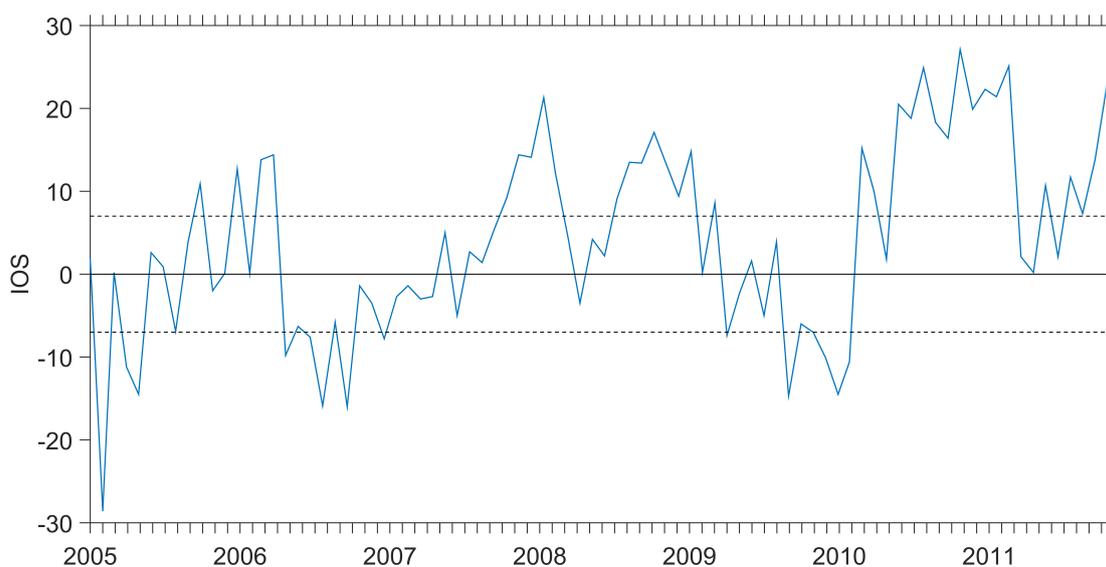


Figura 76: Índices mensais do fenômeno El Niño-Oscilação Sul (IOS) para o período de estudo deste trabalho. Os limites entre  $\text{IOS} = -7$  e  $\text{IOS} = 7$  (linhas pontilhadas) indicam anos classificados como neutros, enquanto que  $\text{IOS} < -7$  e  $\text{IOS} > 7$  representam anos de El Niño e La Niña, respectivamente.

1744 As anomalias de descarga fluvial de acordo com MARQUES (2005) foram po-  
1745 sitivas entre os meses de julho e outubro e negativas entre o final das estações de

1746 primavera e outono, como foi constatado no presente trabalho, com a diferença que  
1747 o menor desvio ocorreu no mês de maio ao invés de junho. As máximas oscilações  
1748 negativas e positivas segundo este autor tiveram valores iguais a  $-600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  em  
1749 julho e  $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  em janeiro, respectivamente, enquanto que no presente estudo  
1750 foram iguais a  $-900 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  em dezembro e  $1.200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  em setembro, respectiva-  
1751 mente. A amplitude de variação dos desvios foi menor em MARQUES (op. cit.)  
1752 por considerar um total de aproximadamente 60 anos de dados, porém apresen-  
1753 tando similaridades temporais com o trabalho em questão. Quanto aos desvios  
1754 de salinidade, em ambos estudos as oscilações positivas iniciam-se em dezembro e  
1755 terminam em junho no fundo da coluna de água, visto que na superfície o término  
1756 ocorre no mês anterior neste estudo. Já as anomalias negativas começam em junho  
1757 e em julho na superfície e no fundo, respectivamente, este último coincidindo com  
1758 o observado em MARQUES (op. cit.), assim como o término em novembro para as  
1759 duas profundidades. Também em concordância com este estudo, o comportamento  
1760 das anomalias de salinidade foi praticamente o inverso do padrão para a descarga  
1761 fluvial.

1762 Contabilizando todas as anomalias dos dados no entorno das respectivas mé-  
1763 dias, há uma maior tendência para a expulsão de água para a costa dentro do  
1764 período de agosto a outubro, possuindo uma pequena defasagem com o obser-  
1765 vado por MARQUES (op. cit.), que foi no intervalo de tempo entre os meses de  
1766 junho a agosto. Segundo este autor, o período de maior contribuição de ventos  
1767 do quadrante sul para a introdução de água salgada no estuário é entre os meses  
1768 de novembro e dezembro, baseando-se nos desvios positivos de salinidade e dos  
1769 ventos de Sul encontrados durante estes meses. Entretanto, anomalias positivas  
1770 de salinidade podem indicar maiores salinidades na costa pela presença de águas  
1771 subtropicais, facilitada pela atuação de ventos de NE no recuo da pluma do Rio  
1772 da Prata (MÖLLER *et al.*, 2008). No presente estudo, através da combinação de

1773 anomalias negativas de descarga fluvial e positivas para ventos do quadrante sul, o  
1774 período mais propício para a salinização do estuário é durante a estação de outono  
1775 — como o observado por MÖLLER & CASTAING (1999) —, mais precisamente  
1776 nos meses de março e maio.

1777 Em relação à estratificação da coluna de água e considerando as médias mensais  
1778 de salinidade e da distribuição de frequência dos tipos de estuário, o mês de março  
1779 seria o mais propício a estratificar verticalmente, apresentando a maior fração de  
1780 tempo em que o estuário foi classificado como tipo parcialmente misturado ( $\sim 43$   
1781 %). O mês com maiores probabilidades de mistura vertical é o mês de setembro,  
1782 pois além de apresentar a maior média mensal de descarga fluvial, também possui  
1783 a maior porcentagem de tempo em que o estuário apresentou condições de tipo  
1784 bem misturado ( $\sim 70$  %). No total, a coluna de água esteve bem misturada ao  
1785 redor de 66 % das ocorrências, quase o dobro de tempo em que o estuário esteve  
1786 classificado como tipo parcialmente misturado.

## 1787 5.2. Ciclos de Enchente-Vazante e Simulações Teó- 1788 ricas

1789 As descargas fluviais médias dos ciclos de enchente-vazante variaram entre va-  
1790 lores de 513 e 3.902  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  observados nos anos de 2005 e 2006, respectivamente.  
1791 Os sistemas frontais tiveram períodos de cinco dias em média, sendo que os inter-  
1792 valos de tempo abrangidos pelos ventos NE foram maiores do que os dos ventos  
1793 SO, com exceção do ano de 2007 em que estes valores foram iguais ( $\sim 2$  dias e  
1794 meio). As intensidades máximas dos ventos de NE durante os ciclos também fo-  
1795 ram maiores do que as dos ventos de SO, apresentando magnitudes que variam  
1796 de aproximadamente  $-7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (2005) a  $-13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (2006) e de  $2,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (2009) a  $10$   
1797  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  (2006), respectivamente.

1798 Os ciclos de enchente-vazante apresentaram um período de cinco dias e meio

1799 em média, com os regimes de vazante cobrindo uma maior fração do tempo do  
1800 que os de enchente, inclusive havendo casos em que as velocidades de enchente  
1801 ficaram restritas a um pequeno intervalo de tempo e observadas somente no fundo  
1802 da coluna de água. As velocidades máximas nas direções de vazante e de enchente  
1803 durante os ciclos variaram de  $-0,6 \text{ m.s}^{-1}$  (2009) a  $-0,8 \text{ m.s}^{-1}$  (2008) e de  $0,1 \text{ m.s}^{-1}$   
1804 (2005) a  $0,6 \text{ m.s}^{-1}$  (2006), respectivamente.

1805 Os perfis médios do componente longitudinal de velocidade ( $v$ ) apresentaram  
1806 três padrões:

1807 i dominados por velocidade de vazante em todas profundidades, como é o caso  
1808 dos ciclos de 2005 e 2008, classificados quanto à descarga fluvial como sendo  
1809 de alta e moderada intensidade, respectivamente. Estes ciclos também foram  
1810 responsáveis pela maior velocidade média ( $-0,65 \text{ m.s}^{-1}$ );

1811 ii bidirecionais com troca de direção para enchente em profundidades próximas  
1812 ao fundo ( $\sim 11,3 \text{ m}$ ), apresentando uma velocidade média de  $-0,3 \text{ m.s}^{-1}$  e  
1813 velocidades de enchente próximas a zero. Este padrão foi o mais comum  
1814 dentre os ciclos de enchente-vazante;

1815 iii bidirecionais com troca de direção para enchente em menores profundidades  
1816 ( $\sim 9,8 \text{ m}$ ), com uma velocidade máxima pouco intensa ( $-0,2 \text{ m.s}^{-1}$ ) e mais  
1817 comparável à máxima velocidade de enchente ( $0,1 \text{ m.s}^{-1}$ ). Este último padrão  
1818 somente foi observado no ano de 2006.

1819 As classificações dos estuários tiveram que ser feitas considerando também a  
1820 diferença de salinidade entre a superfície e o fundo ( $\delta S$ ), conforme PRITCHARD  
1821 (1989), e o perfil médio vertical do componente longitudinal de velocidade ( $v$ ), visto  
1822 que a classificação segundo o Diagrama Estratificação-Circulação de HANSEN &  
1823 RATTRAY (1966) e o parâmetro adimensional  $\nu$  não foram confiáveis. A não-  
1824 aplicação da teoria do diagrama e de  $\nu$  no estuário da Lagoa dos Patos deve-se ao

1825 motivo de que a área de estudo não é um estuário clássico, forçado pela maré e  
1826 com ciclos de maré bem definidos, e sim possuindo uma dinâmica controlada pela  
1827 ação dos ventos e da descarga fluvial. Além disso, grande parte da mistura vertical  
1828 é provocada por advecção oriunda de intensas descargas fluviais, em contraposto  
1829 com a teoria, em que a estratificação vertical é mantida pela descarga de água  
1830 doce.

1831 Quanto às classificações dos tipos de estuário vigentes durante os ciclos de  
1832 enchente-vazante, a maioria enquadrou-se nos tipos bem misturado (tipo 1) e par-  
1833 cialmente misturado com fraca estratificação vertical (tipo 2a). Somente o ciclo  
1834 do ano de 2007 apresentou uma classificação diferente, que foi de estuário parcial-  
1835 mente misturado com marcada estratificação vertical (tipo 2b). Este mesmo ciclo  
1836 foi responsável pela maior diferença de salinidade entre a superfície e o fundo ( $\delta S$ ),  
1837 sendo igual a 18,4 ‰, enquanto que a menor diferença encontrada foi de 1,6 ‰ em  
1838 2009. Com exceção do ciclo de 2007, os valores de  $\delta S$  foram todos menores do que  
1839 9,4 ‰.

1840 Mesmo nos casos em que os ciclos de enchente-vazante apresentaram um valor  
1841 de  $\delta S > 5$  ‰, as simulações a partir da solução que considera atrito moderado  
1842 no fundo (Equação 3.19a) apresentaram melhores resultados do que as simulações  
1843 realizadas com a solução de atrito máximo (Equação 3.17a). Os valores de Skill  
1844 das simulações teóricas dos perfis estacionários de velocidade variaram entre 0,67  
1845 no ciclo de 2008 a 0,99 nos anos de 2006, 2009 e 2011. No geral, estes valores foram  
1846 maiores do que 0,92 com exceção dos ciclos pertencentes aos anos de 2008 e 2005  
1847 (Skill = 0,72). Quanto às classificações da qualidade dos resultados considerando  
1848 o erro médio absoluto (RMAE), a maioria enquadrou-se na faixa denominada  
1849 “excelente”, com duas simulações classificadas como “bom” (ciclos de 2005 e 2010)  
1850 e uma como “razoável” (ciclo de 2008). As simulações destes três últimos anos  
1851 foram as que apresentaram os maiores valores de erro médio quadrático (RMSE),

1852 os quais representaram 47 %, 22 % e até 60 % da variação total dos dados de  
1853 velocidade de cada respectivo ciclo de enchente-vazante. O restante das simulações  
1854 apresentaram valores de RMSE que corresponderam a menos do que 9 % do *range*  
1855 total dos dados.

1856 Todas as reproduções dos perfis estacionários de salinidade possuíram valores  
1857 de Skill máximo (igual a 1), visto que somente se tem dados de salinidade na  
1858 superfície e no fundo para comparar com as simulações. Os valores de RMAE para  
1859 as simulações dos perfis de salinidade enquadraram-se na qualificação “excelente”  
1860 em todos os casos. Semelhantemente, os valores de RMSE representaram de 0,2 %  
1861 a 5% da variação total dos dados de salinidade em cada ciclo, apenas. Entretanto,  
1862 o ideal seria validar os resultados das simulações dos perfis médios de salinidade  
1863 com dados de campo obtidos através de cruzeiros que passassem sobre o ponto de  
1864 fundeio, em intervalos fixos de tempo.

1865 Em praticamente todas as simulações, os valores do coeficiente de arrasto de  
1866 fundo ( $k$ ) foram uma ordem de grandeza menor do que o valor constante de  
1867  $2,5 \times 10^{-3}$ , sendo que apenas o ciclo do ano de 2005 apresentou um valor próximo  
1868 ( $1,9 \times 10^{-3}$ ). O valor do coeficiente  $k$  tende a influenciar de forma inversa a inclina-  
1869 ção da curva dos perfis e, consequentemente, o cisalhamento vertical da corrente e  
1870 a estratificação de salinidade. Assim sendo, por analogia, os menores valores de  $k$   
1871 encontrados no geral denotam um maior cisalhamento vertical da corrente e maior  
1872 estratificação da coluna de água quando comparado a seu valor constante.

1873 Os coeficientes  $N_z$  e  $K_z$  utilizados nas simulações dos perfis e que geraram os  
1874 melhores resultados pertencem à faixa de valores entre  $6,2 \times 10^{-4}$  e  $2,7 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$   
1875 e entre  $2,7 \times 10^{-5}$  e  $2,1 \times 10^{-2} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , respectivamente. Entretanto, a variação total  
1876 de valores que representa os limites de reprodução do modelo analítico foi de  
1877  $7,5 \times 10^{-5}$  a  $2,2 \times 10^{-1} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  para o coeficiente  $N_z$  e de  $4,1 \times 10^{-6}$  a  $1,3 \times 10^{-1} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  para  
1878 o coeficiente  $K_z$ . MIRANDA & CASTRO (1996) realizaram um estudo na região

1879 sul do Mar de Cananéia por dois ciclos completos de maré em dezembro de 1991 e  
1880 utilizaram o modelo analítico unidimensional segundo OFFICER (1977). O perfil  
1881 simulado apresentou concordância com o observado utilizando um valor de  $N_z$  de  
1882 aproximadamente  $2 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , com mesma ordem de grandeza do limite superior  
1883 de  $N_z$  utilizado nas simulações deste trabalho.

1884 BERNARDES (2001) estudou a circulação estacionária do sistema estuarino  
1885 de Cananéia e no Canal de Bertioga através de 41 estações fixas que abrangeram  
1886 pelo menos um ciclo de maré semidiurna durante os anos de 1991, 1993-1994, 1998-  
1887 1999 e 2000. Modelos analíticos, tanto uni- como bidimensionais, foram utilizados  
1888 neste trabalho para simular os perfis estacionários do componente longitudinal de  
1889 velocidade e de salinidade. Os resultados das simulações com os modelos segundo  
1890 HANSEN & RATTRAY (1965), FISHER *et al.* (1972), PRANDLE (1985) e MI-  
1891 RANDA (1998) no geral foram satisfatórios, apresentando altas correlações com  
1892 os perfis experimentais. A variação de valores médios do coeficiente  $N_z$  utilizados  
1893 nas simulações com a mesma solução teórica que este trabalho (Equação 3.19a)  
1894 foi entre  $\sim 0 \times 10^{-4}$  a  $1,5 \times 10^{-2} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , apresentando uma ordem de grandeza superior  
1895 comparado ao presente estudo. Já os valores de  $K_z$  utilizados por BERNARDES  
1896 (op. cit.) para a mesma solução teórica variaram de aproximadamente  $3 \times 10^{-8}$  a  
1897  $3,3 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , chegando até três ordens de grandeza menor do que o valor mínimo  
1898 utilizado neste trabalho.

1899 MIRANDA *et al.* (2005) utilizaram o modelo bidimensional de acordo com  
1900 HANSEN & RATTRAY (1965) para simular os perfis estacionários do compo-  
1901 nente longitudinal de velocidade e de salinidade no Rio Curimataú (RN). Dois  
1902 ciclos completos de maré foram amostrados durante as fases lunares de quadra-  
1903 tura e sizígia no final de abril e início de maio de 2001. A simulação do perfil de  
1904 velocidade obteve um valor de RMAE igual a 0,7, classificando o resultado como  
1905 “razoável”, enquanto que o perfil de salinidade apresentou uma baixa concordância

1906 com o experimental. O valor do coeficiente  $N_z$  sofreu um aumento da simulação de  
1907 quadratura ( $1 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) para a de sizígia ( $3 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ), sendo que as ordens de  
1908 grandeza destes valores representam os limites inferior e superior deste trabalho,  
1909 respectivamente. Esta diferenciação nos valores de  $N_z$  entre os regimes de quadra-  
1910 tura e sizígia não foi observada neste trabalho ao considerar diferentes condições  
1911 de descarga fluvial, visto que tanto o menor (ano de 2005), quanto o maior valor  
1912 (ano de 2010) deste coeficiente foram ambos encontrados em descarga fluvial alta.  
1913 Os valores do coeficiente  $K_z$  utilizados por MIRANDA *et al.* (2005) foram iguais a  
1914  $3 \times 10^{-3}$  e  $1 \times 10^{-2} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  nos regimes de quadratura e sizígia, respectivamente, ambos  
1915 correspondendo a ordens de grandezas inseridas na variação de valores deste tra-  
1916 balho. O aumento sofrido pelo coeficiente  $K_z$  do regime de quadratura para o de  
1917 sizígia pode ser análogo ao aumento observado no presente estudo de condições de  
1918 baixa descarga fluvial para de alta. Em estuários controlados pela ação da maré  
1919 sobre a circulação, condições mais bem misturadas são observadas no regime de  
1920 sizígia pela corrente de maré possuir maior intensidade para quebrar a estratifica-  
1921 ção vertical do que em regime de quadratura. Como já mencionado anteriormente,  
1922 a circulação da Lagoa dos Patos é primariamente controlada pela descarga fluvial  
1923 e pelo vento (remoto e local) em detrimento da ação da maré, onde condições bem  
1924 misturadas são atingidas por advecção causada por intensas descargas fluviais. A  
1925 exemplo disso, o ciclo de enchente-vazante do ano de 2005 apresentou fraca estra-  
1926 tificação vertical ( $\delta S = 2,1 \text{ ‰}$ ), a maior descarga fluvial média ( $3.902 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) e  
1927 o maior valor de  $K_z$  ( $2,1 \times 10^{-2} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ), sendo classificado como estuário tipo bem  
1928 misturado (tipo 1). Em contraste, o ciclo do ano de 2006 apresentou um maior  
1929 valor de  $\delta S$  ( $6,2 \text{ ‰}$ ), a menor descarga fluvial média ( $513 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) e o menor valor  
1930 de  $K_z$  ( $2,7 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ), sendo classificado como parcialmente misturado com fraca  
1931 estratificação vertical (tipo 2a).

1932 Quanto às magnitudes das forçantes nos perfis estacionários de velocidade,

1933 a magnitude da tensão de cisalhamento do vento somente se torna comparável  
1934 à descarga fluvial em condições de baixa vazão, apresentando mesma ordem de  
1935 grandeza e em nenhum caso sendo superior. As magnitudes nos perfis de salinidade  
1936 foram dominadas pela descarga fluvial e pelo gradiente longitudinal de densidade  
1937 nas três condições de vazão, na maioria dos casos apresentando as mesmas ordens  
1938 de grandeza, enquanto que as magnitudes da tensão de cisalhamento do vento  
1939 foram todas desprezíveis, chegando a ser até nove ordens de grandeza menor do  
1940 que as demais forçantes. Considerando vazões intermediárias e altas, as maiores  
1941 magnitudes nos perfis de velocidade pertenceram à forçante descarga fluvial, por  
1942 vezes apresentando a mesma ordem de grandeza do que o gradiente longitudinal  
1943 de densidade, sendo esta última a única forçante sem dados observacionais. Já a  
1944 tensão de cisalhamento do vento nestas condições apresentou magnitudes de uma  
1945 ordem de grandeza menor do que as outras duas forçantes, reforçando o que já  
1946 foi constatado por estudos anteriores de que a ação do vento é sobreposta pela  
1947 descarga fluvial em intensidades moderadas e altas (MÖLLER & CASTAING,  
1948 1999; MÖLLER *et al.*, 2001; MARQUES, 2005; ÁVILA *et al.*, 2011).

1949 Nos estudos desenvolvidos por MIRANDA (1990), MIRANDA & CASTRO  
1950 (1996), BERNARDES (2001) e MIRANDA *et al.* (2005; 2012), as principais for-  
1951 çantes da circulação estacionária foram a descarga fluvial e o gradiente longitudinal  
1952 de densidade, com a tensão de cisalhamento do vento estando em segundo plano ou  
1953 sendo negligenciável em três estuários diferentes e em regiões distintas. Estes tra-  
1954 balhos calcularam as magnitudes das forçantes desconsiderando as suas variações  
1955 ao longo do eixo Z. O que foi notado neste estudo e abordado na seção de Mate-  
1956 rial e Métodos é que somente se observa o papel do vento em relação às demais  
1957 forçantes quando as magnitudes são analisadas por médias ao longo da coluna de  
1958 água ao invés de desconsiderar a variação vertical, visto que esta abordagem tende  
1959 a suprimir o efeito do vento, tornando-o negligenciável.

## 1960 Capítulo 6

### 1961 CONSIDERAÇÕES FINAIS

1962 • A base de dados utilizada neste estudo foi longa o suficiente para permitir a  
1963 representatividade das análises estatísticas para o canal do estuário da Lagoa  
1964 dos Patos, visto que concordaram com os padrões observados em trabalhos  
1965 anteriores (MARQUES, 2005; VAZ *et al.*, 2006), mesmos estes apresentando  
1966 séries longas de aproximadamente 60 anos de dados;

1967 • A coluna de água permaneceu bem misturada por aproximadamente 66 %  
1968 do tempo e as diferenças de salinidade entre a superfície e o fundo ( $\delta S$ )  
1969 geralmente foram menores do que 9,4 ‰, explicando porque a solução para  
1970 estuários bem misturados (Equação 3.19a) produziu melhores resultados,  
1971 mesmo em condições parcialmente misturadas;

1972 • A caracterização dos ciclos de enchente-vazante foi pensada de forma a se  
1973 obter períodos de estufa homogêneos verticalmente para simular o comporta-  
1974 mento de um ciclo de maré; entretanto, esta adaptação da teoria não garante  
1975 um estado de estacionariedade por completo no Canal de Acesso à Lagoa dos  
1976 Patos pelas seguintes razões:

1977 i Ciclos de enchente-vazante de longo período ( $\sim 5$  dias), enquanto que

- 1978 um ciclo de maré tem duração máxima de aproximadamente 24 horas;
- 1979 ii Poucos ciclos de enchente-vazante por ano (MIRANDA, 1998) por de-  
1980 pender da uniformidade dos sistemas frontais para garantir a seme-  
1981 lhança com ciclos de maré;
- 1982 iii Assimetria entre os intervalos de tempo abrangidos pelos regimes de  
1983 vazante e de enchente, inclusive havendo casos em que as velocidades  
1984 de enchente mantiveram-se restritas ao fundo da coluna de água devido  
1985 a vazões intensas;
- 1986 iv Hidrodinâmica dos ciclos de enchente-vazante determinada por ventos  
1987 paralelos à costa (WEISBERG, 1976).
- 1988 • Apesar das adaptações necessárias para garantir a aplicabilidade dos mo-  
1989 delos analíticos, as simulações dos perfis dos componentes longitudinais de  
1990 velocidade e de salinidade produziram resultados satisfatórios, com valores  
1991 do parâmetro Skill no geral maiores do que 0,92 (ajuste perfeito = 1) e va-  
1992 lores do erro médio quadrático (RMSE) que em maioria corresponderam às  
1993 qualificações de “bom” a “excelente”;
- 1994 • Devido ao estuário da Lagoa dos Patos não se enquadrar na definição de es-  
1995 tuário clássico, a classificação de estuários de HANSEN & RATTRAY (1966)  
1996 e o parâmetro  $\nu$  não foram aplicáveis à região em questão, visto que a classi-  
1997 ficação como estuário bem misturado neste estudo não é relativa a um maior  
1998 papel da corrente de maré em promover mistura vertical por difusão, mas  
1999 sim por advecção oriunda de intensas descargas fluviais;
- 2000 • De mesma forma, os modelos analíticos apresentaram dificuldades em simular  
2001 os perfis médios de velocidade em condições de descarga fluvial alta ou de  
2002 domínio das direções de vazante sobre as de enchente, provavelmente pela

- 2003 grande entrada de água doce não representar manutenção da estratificação  
2004 vertical conforme prediz a teoria;
- 2005 • As estimativas dos coeficientes de viscosidade ( $N_z$ ) e de difusão turbulenta  
2006 ( $K_z$ ) concordaram com estudos anteriores desenvolvidos com essencialmente  
2007 os mesmos modelos analíticos em outros estuários do Brasil;
- 2008 • Não se observou influência das diferentes condições de descarga fluvial nos  
2009 valores mínimos e máximos de  $N_z$ , em contraposto com o aumento sofrido  
2010 pelos valores de  $K_z$  de intensidades baixas para altas;
- 2011 • Observou-se um papel menos significativo da tensão de cisalhamento do vento  
2012 em vazões moderadas a altas, conforme estudos anteriores na região;
- 2013 • As magnitudes do vento nos perfis de velocidade e de salinidade podem estar  
2014 sendo subestimadas por não levar em consideração o seu importante efeito  
2015 remoto na circulação. A introdução dos dois efeitos do vento em mode-  
2016 los analíticos de circulação estacionária representa um desafio para estudos  
2017 futuros;
- 2018 • Desconsiderar a variação vertical das magnitudes das forçantes pode tornar  
2019 negligenciável a ação do vento na circulação estacionária;
- 2020 • Tendo em vista os resultados satisfatórios das simulações da circulação quasi-  
2021 estacionária do Canal de Acesso à Lagoa dos Patos, assim como o pioneirismo  
2022 deste trabalho em aplicar modelos analíticos em um estuário regido pela ação  
2023 de ventos e da descarga fluvial, espera-se incentivar mais estudos sobre este  
2024 tema e promover soluções que busquem atingir o estado de real estacionari-  
2025 dade em ambientes similares; uma sugestão seria considerar a alta frequência  
2026 (maré) dos dados de velocidade e dados de nível da superfície livre com o  
2027 objetivo de se obter um maior número de ciclos de maré.

## 2028 Capítulo 7

### 2029 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

2030 ANTIQUEIRA, J. DE & CALLIARI, L. (2005). Características Sedimentares Da  
2031 Desembocadura Da Laguna Dos Patos, 39, 46. GRAVEL, ISSN 1678-5975, Novembro  
2032 de 2005, No. 3, pp 39-46, Porto Alegre.

2033 ARONS, A. B. & STOMMEL, H. (1951). A Mixing-Length Theory of Tidal Flushing.  
2034 Transactions-American Geophysical Union, 32(3):419-421.

2035 ÁVILA, R. A., ANDRADE, M. M. & MÖLLER JR, O. O. (2011). Aspectos Hidro-  
2036 dinâmicos do Canal de Acesso ao Porto de Rio Grande em Períodos de Alta e Baixa  
2037 Descarga. Anais do IX Simpósio sobre Ondas, Marés, Engenharia Oceânica e Oceano-  
2038 grafia por Satélite (OMARSAT), Arraial do Cabo, RJ.

2039 BERNARDES, M. E. C. (2001). Circulação Estacionária e Estratificação de Sal  
2040 em Canais Estuarinos Parcialmente Misturados: Simulação com Modelos Analíticos.  
2041 Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico, Brasil,  
2042 202 p.

2043 CAMERON, W. M. & PRITCHARD, D. W. (1963). Estuaries. In: The Sea, Vol. 2,  
2044 M. N. Hill, Editor, Interscience, New York, Pp. 306-324.

2045 CASTELÃO, R. M. & MÖLLER, O. O. (2003). Sobre a Circulação Tridimensional  
2046 Forçada por Ventos na Lagoa dos Patos. Atlântica, 25(2001), 91-106.

2047 CASTELLO, J. P. (1985). La Ecologia de Los Consumidores Del Estuario da Lagoa

- 2048 dos Patos, Brasil. Em: Yañes-arancibia, A. (ed.). Fish Community Ecology in Estuaries  
2049 and Coastal Lagoons: Towards an Ecosystem Integration. DR (R) UNAM Press, México,  
2050 17:383-406.
- 2051 COSTA, R. L. (2009). Estudo sobre a Variabilidade Sazonal e da Estrutura Vertical  
2052 das Correntes Costeiras da Plataforma Interna, ao Largo de Rio Grande – RS. Dissertação  
2053 de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande, Brasil, 97 p.
- 2054 DELANEY, P. J. V. (1965). Fisiografia e Geologia da Superfície da Planície Costeira  
2055 do Rio Grande do Sul. Publicação Especial da Escola de Geologia, Universidade Federal  
2056 do Rio Grande do Sul, Porto Alegre (6) p.63.
- 2057 FERNANDES, E. H. L. (2001). Modelling the Hydrodynamics of the Patos Lagoon,  
2058 Brasil. Tese de doutorado. University of Plymouth, 198 p.
- 2059 FERNANDES, E. H. L., DYER, K. R. & MÖLLER JR, O. O. (2002). The Patos  
2060 Lagoon Hydrodynamics During an El Niño Event (1998). Continental Shelf Research,  
2061 22(11-13):1699-1713.
- 2062 FERNANDES, E. H. L., MARIÑO-TAPIA, I., DYER, K. R. & MÖLLER, O. O. Jr.  
2063 (2004). The Attenuation of Tidal and Subtidal Oscillations in the Patos Lagoon Estuary.  
2064 Ocean Dynamics, 54(3-4):348-359.
- 2065 FERNANDES, E. H. L., DYER, K. R. & MÖLLER, O. O. Jr., (2005). Spatial  
2066 Gradient in the flow of Southern Patos Lagoon. Journal of Coastal Research, 21(4):759-  
2067 769.
- 2068 FICK, A. (1855). Ueber Diffusion. Annalen der Physik, 170(1):59-86.
- 2069 FISCHER, H. B. (1972). Mass Transport Mechanisms in Partially Stratified Estua-  
2070 ries. J. Fluid Mech., 53:672-687.
- 2071 FISHER, J. S., DITMARS, J. D. & IPPEN, A. T. (1972). Mathematical Simulation  
2072 of Tidal-Time Averages of Salinity and Velocity Profiles in Estuaries. Massachusetts  
2073 Institute of Technology, Mass., Rept. MITSG 72-11, 157 p.
- 2074 GAFRÉE, C. L. (1927). Relatório sobre Medições de Correntes. Relatório apresen-  
2075 tado ao Inspetor Federal de Portos, Rios e Canais, Rio Grande, RS.
- 2076 HANSEN, D. V. & RATTRAY JR, M., (1965). Gravitational Circulation in Straits

- 2077 and Estuaries. *J. Mar. Res.*, 23(1):102-122.
- 2078 HANSEN, D. V. & RATTRAY JR, M., (1966). New Dimensions in Estuary Classi-  
2079 fication. *Limnol. Oceanogr.*, 11(3):319-325.
- 2080 HARLEMAN, D. F. R. & ABRAHAM, G. (1966). One-Dimensional Analysis of  
2081 Salinity Intrusions in the Rotterdam Waterway. Delft, Holanda, Delft Hydraulics Labo-  
2082 ratory. 35 p. (Publication, 44).
- 2083 HARTMANN, C., & SCHETTINI, C. (1991). Aspectos Hidrológicos na Desemboca-  
2084 dura da Laguna dos Patos, RS. *Revista Brasileira de Geociências*, 21(4), 371-377.
- 2085 HERZ, R. (1977). Circulação das Águas de Superfície da Lagoa dos Patos. Tese de  
2086 Doutorado, Universidade de São Paulo, Brasil, 340p.
- 2087 IPPEN, A. T. & HARLEMAN, D. R. F. (1961). One-Dimensional Analysis of Salinity  
2088 Intrusion in Estuaries. Committee on Tidal Hydraulics. Tech. Bull Corps of Engineers  
2089 U. S. Army, n. 5. 120p.
- 2090 KETCHUM, B. H. (1951). The Exchange of Fresh and Salt Waters in Tidal Estuaries:  
2091 Sears Found. *J. Mar. Res.*, 10:18-38.
- 2092 KJERFVE, B. (1986). Comparative Oceanography of Coastal Lagoons. In: Wolfe,  
2093 D. A. (ed.). *Estuarine Variability*. Orlando, Fl.: Academic Press, 63-81.
- 2094 LERCZAK, J., GEYER, W. & CHANT, R. (2006). Mechanisms Driving the Time-  
2095 Dependent Salt Flux in a Partially Stratified Estuary. *Journal of Physical Oceanography*,  
2096 v. 36, n. 12, p. 2296-2311.
- 2097 MARQUES, W. C. (2005). Padrões de Variabilidade Temporal nas Forçantes da  
2098 Circulação e seus Efeitos na Dinâmica da Lagoa dos Patos, Rio Grande do Sul, Brasil.  
2099 Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande, Brasil, 87p.
- 2100 MARQUES, W. C., STRINGARI, C. & EIDT, R. (2014). The Exchange Processes of  
2101 the Patos Lagoon Estuary, Brazil: a Typical El Niño Year versus a Normal Meteorological  
2102 Conditions Year. *Advances in Water Resource and Protection*, V.2, pp. 11-19.
- 2103 MARTINS, I. M. S., DIAS, J. M., FERNANDES, E. H. L. & MUELBERT, J. H.  
2104 (2007). Numerical Modelling of Fish Eggs Dispersion at the Patos Lagoon Estuary -  
2105 Brazil. *Journal of Marine Systems*, 68(1):537-555.

- 2106 MESQUITA, A. R. & HARARI, J. (1983). Tides and Tide Gauges of Cananéia and  
2107 Ubatuba - Brazil (lat. 24°S). Relatório Interno do Instituto Oceanográfico da Universi-  
2108 dade de São Paulo, 11:1-14.
- 2109 MIRANDA, L. B. (1990). Sistemas Estuarinos de Planície Costeira: Estrutura Dinâ-  
2110 mica, Processos de Mistura e Aplicações. In: II Simpósio de Ecossistemas da Costa Sul  
2111 e Sudeste Brasileira, Estrutura, Função e Manejo. Águas de Lindóia, São Paulo. ACIESP,  
2112 71(2):1-46.
- 2113 MIRANDA, L. B. & CASTRO, B. M. de. (1996). On the Salt Transport in the  
2114 Cananéia Sea during a Spring Tide Experiment. Revista Brasileira de Oceanografia,  
2115 44(2):123-133.
- 2116 MIRANDA, L. B. (1998). Cinemática e Dinâmica de Estuários. Notas de Aula do  
2117 Curso de Pós-Graduação - IOF-827. Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico,  
2118 469p.
- 2119 MIRANDA, L.B., CASTRO, B.M. & KJERFVE, B. (2002, 1a Ed). Princípios de  
2120 Oceanografia Física de Estuários. Editora da Universidade de São Paulo, S. P., (Coleção  
2121 Acadêmica 42), 424 p.
- 2122 MIRANDA, L.B., BÉRGAMO, A. L. & CASTRO, B.M. (2005). Interactions of River  
2123 Discharge and Tidal Modulation in a Tropical Estuary, NE Brazil. Ocean Dynamics,  
2124 55:430-440.
- 2125 MIRANDA, L.B., CASTRO, B.M. & KJERFVE, B. (2012), 2a Ed). Princípios de  
2126 Oceanografia Física de Estuários. Editora da Universidade de São Paulo, S. P., (Coleção  
2127 Acadêmica 42), 432p.
- 2128 MIRANDA, L.B., CASTRO, B.M., OLLE, E. D., BÉRGAMO, A. L., SILVA, L. S.  
2129 & ANDUTTA, F. P. (2012). Circulation and Salt Intrusion in the Piaçaguera Channel,  
2130 Santos (SP). Braz. j. oceanogr, 60(1):11-23.
- 2131 MÖLLER, O. O. Jr., PAIM, P. S. & SOARES, I. D. (1991). Facteurs et Mécanismes  
2132 de la Circulation des eaux dans l'estuaire de la Lagune dos Patos. Bulletin Institut de  
2133 Géologie du Bassin d'Aquitaine 49:15-21.
- 2134 MÖLLER, O. O. Jr. (1996). Hydrodynamique de la lagunes dos Patos. Mesures et

- 2135 Modélisation. Dissertação de Mestrado, University Bordeaux I, Bordeaux, France.
- 2136 MÖLLER, O. O. Jr., NIENCHESKI, L. F. H., ODEBRECHT, C. & GLOEDEN, I.  
2137 (1996). Espinha de Peixe na Lagoa dos Patos. Relatório técnico. FURG.
- 2138 MÖLLER, O. O. Jr. & CASTAING, P. (1999). Hydrodological Characteristics of  
2139 the Estuarine Area of Patos Lagoon (30°S, Brazil). In: PERILLO, G.M., PICCOLO,  
2140 M.C., PINO-QUIVIRA, M. (Eds.), Estuaries of South America. Springer, New York, pp.  
2141 83-100.
- 2142 MÖLLER, O. O. Jr., CASTAING, P., SALOMON, J. & LAZURE, P. (2001). The  
2143 Influence of Local and Non-local Forcing Effects on the Subtidal Circulation of Patos  
2144 Lagoon. *Estuaries and Coasts*, 24(2), 275-289.
- 2145 MÖLLER, O. O. Jr., CASTAING, P., FERNANDES, E. H. L. & LAZURE, P. (2007).  
2146 Tidal frequency dynamics of a southern Brazil coastal lagoon: choking and short period  
2147 forced oscillations. *Estuaries and Coasts*, 30(2):311-320.
- 2148 MÖLLER, O. O. Jr., PIOLA, A. R., FREITAS, A. C., CAMPOS, E. J. D. (2008).  
2149 The Effects of River Discharge and Seasonal Winds on the Shelf off Southeastern South  
2150 America. *Continental Shelf Research*, 28:1607-1624.
- 2151 NETO, A. M. (1996). Estudo da Variabilidade Subtidal do Estuário da Lagoa dos  
2152 Patos. Monografia. Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Brasil, 56 p.
- 2153 OFFICER, C. B. (1976). *Physical Oceanography of Estuaries (and Associated Co-*  
2154 *astal Waters)*. New York, Wiley, 465 p.
- 2155 OFFICER, C. B. (1977). Longitudinal Circulation and Mixing Relations in Estuaries.  
2156 In: *Estuaries, Geophysics and the Environment*. Washington D. C., National Academy  
2157 of Sciences, p 13-21.
- 2158 PAIM, P. S. & MÖLLER JR, O. O. (1986). Material em Suspensão e Dissolvido no  
2159 Estuário da Lagoa dos Patos – Fase III. Relatório Técnico, FURG/CIRM, 133 p.
- 2160 PAWLOWICZ, R., BEARDSLEY, B. & LENTZ, S. (2002). Classical Tidal Harmo-  
2161 nic Analysis Including Error Estimates in MATLAB using T\_TIDE. *Computers and*  
2162 *Geosciences*, 28:929-937.
- 2163 PIOLA, A. R., CAMPOS, E. J. D., MÖLLER, O. O., CHARO, M. & MARTINEZ,

- 2164 C. M. (2000). Subtropical Shelf Front off Eastern South America. *Journal of Geophysical*  
2165 *Research* 105:6566-6578.
- 2166 PIOLA, A. R., MATANO, R. P., PALMA, E., MÖLLER, O. O. & CAMPOS, E. J.  
2167 D. (2005). The Influence of the Plata River Discharge on the Western South Atlantic  
2168 Shelf. *Geophysical Research Letters*, 32:1-4.
- 2169 PRANDLE, D. 1985. On Salinity Regimes and the Vertical Structure of Residual  
2170 Flows in Narrow Tidal Estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Sciences*, 20:615-635.
- 2171 PRITCHARD, D. (1955). Estuarine Circulation Patterns. *Proc. Am. Soc. Civil*  
2172 *Eng.* 81(717):1-11.
- 2173 PRITCHARD, D. W. (1989). Estuarine Classification – A Help or a Hindrance. In:  
2174 NEILSON, B. J., KUO, A. & BRUBAKA, J. (eds). *Estuarine Circulation*. Clifton,  
2175 Humana, 1-38 p.
- 2176 REYNOLDS, O. (1895). On the Dynamical Theory of Incompressible Viscous Fluids  
2177 and the Determination of the Criterion. *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A* 186:123-  
2178 164.
- 2179 RIBEIRO, C. R. (2008). Processos de Alterações da Maré Astronômica na Desem-  
2180 bocadura da Lagoa dos Patos. *Dissertação de Mestrado*. Universidade Federal do Rio  
2181 Grande, Brasil, 99 p.
- 2182 SCOTT, C.F. (1993). Canonical Parameters for Estuarine Classification. *Estuarine,*  
2183 *Coastal and Shelf Science*, 36:529-540.
- 2184 STACEY, M. T., BURAU, J. & MONISMITH, S. G. (2001). Creation of Residual  
2185 Flows in a Partially Stratified Estuary. *Journal of Geophysical Research*, 106:17013-  
2186 17037.
- 2187 TOLDO, E. E. Jr., AYUP-ZOUAIN, R. N., CORRÊA, I.C. S. & DILLENBURG,  
2188 S.R. (1991). Barra Falsa: Hipótese de um Paleocanal Holocênico de Comunicação entre  
2189 a Laguna dos Patos e o Oceano Atlântico. *Pesquisas*, 18(2):99-103.
- 2190 TOLDO, E. E. Jr. (1994). *Sedimentação, Predição do Padrão de Ondas, e Dinâmica*  
2191 *Sedimentar da Antepraia e Zona de Surfe do Sistema Lagunar da Lagoa dos Patos, RS.*  
2192 *Tese de Doutorado*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

2193 TOMAZELLI, L. J. (1993). O Regime de Ventos e a Taxa de Migração das Dunas  
2194 Eólicas Costeiras do Rio Grande do Sul, Brasil. *Pesquisas*, 20:18-26.

2195 VAZ, A. C., MÖLLER O. O. Jr. & ALMEIDA, T. L. (2006). Análise Quantitativa  
2196 da Descarga dos Rios Afluentes da Lagoa dos Patos. *Atlântica*, Rio Grande, 28(1):13-23.

2197 WALSTRA, L.C., VAN RIJN, L.C., BLOGG, H. & VAN ORMONDT, M. (2001).  
2198 Evaluation of a Hydrodynamic Area Model Based on the COAST3D Data at Teignmouth  
2199 1999. Report TR121-EC MAST Project No. MAS3-CT97-0086, HR Wallinford, UK, Pp.  
2200 D4.1-D4.4

2201 WARNER, J. C., GEYER, W. R. & LERCZAK, J. A. 2005. Numerical Modeling  
2202 of an Estuary: A Comprehensive Skill Assessment. *Journal of Geophysical Research*,  
2203 110(CO5001):1-13.

2204 WEISBERG, R. H. (1976). A Note on Estuarine Mean Flow Estimation. *J. mar.*  
2205 *Res.*, 34(3):387-394.

2206 WILMOTT, C.J. (1981). On the Validation Models. *Physical Geography*, vol. 2, p.  
2207 184-194.

2208 Links:

2209 ANA (Agência Nacional de Águas) -

2210 <http://hidroweb.ana.gov.br/HidroWeb/>

2211 ANTAQ (Agência Nacional de Transportes Aquaviários) -

2212 <http://www.antaq.gov.br/portal/AnuarioEstatisticoAquaviario>