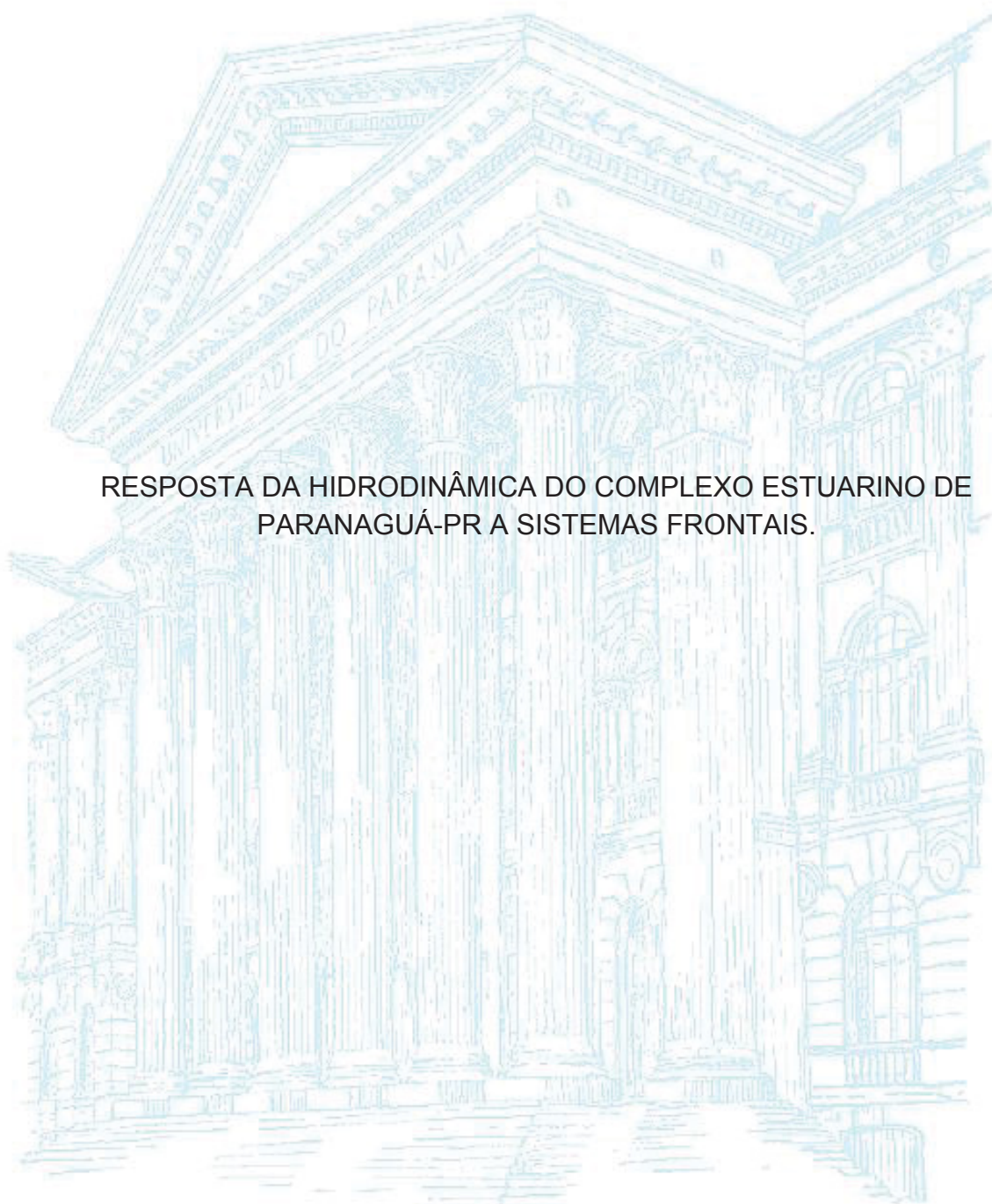


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

TÁBATA FERNANDA VILAS BOAS DE MIRANDA

RESPOSTA DA HIDRODINÂMICA DO COMPLEXO ESTUARINO DE
PARANAGUÁ-PR A SISTEMAS FRONTAIS.



CURITIBA

2016

TÁBATA FERNANDA VILAS BOAS DE MIRANDA

RESPOSTA DA HIDRODINÂMICA DO COMPLEXO ESTUARINO DE
PARANAGUÁ-PR A SISTEMAS FRONTAIS.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. José Eduardo Gonçalves.

CURITIBA

2016

M672r

Miranda, Tábata Fernanda Vilas Boas de

Resposta da hidrodinâmica do complexo estuarino de Paranaguá-PR a sistemas frontais / Tábata Fernanda Vilas Boas de Miranda. – Curitiba, 2016.

129 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, 2016.

Orientador: José Eduardo Gonçalves.

1. Modelagem atmosférica. 2. Modelagem hidrodinâmica. 3. Delft3D. I. Universidade Federal do Paraná. II. Gonçalves, José Eduardo. III. Título.

CDD: 551.46

TERMO DE APROVAÇÃO

TÁBATA FERNANDA VILAS BOAS DE MIRANDA

“Resposta da Hidrodinâmica do Complexo Estuarino de Paranaguá – PR a sistemas Frontais”

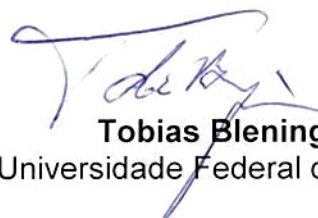
Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, pela comissão formada pelos professores:

PRESIDENTE:



José Eduardo Gonçalves
Sistema Meteorológico do Paraná
Orientador

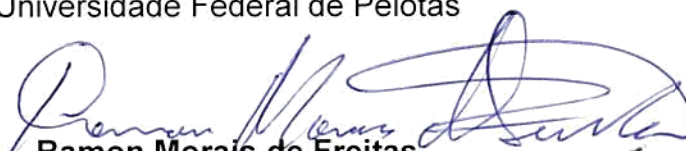
MEMBROS:



Tobias Bleninger
Universidade Federal do Paraná



Leonardo Calvetti
Universidade Federal de Pelotas



Ramon Moraes de Freitas
Camargo Schubert Engenharia
Universidade Federal de Itajubá.

Curitiba, 08 de março de 2016

*Dedico a minha tia Solange
e a minha avó Célia.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha tia Solange e a minha avó, sem as quais nada em minha vida seria possível.

Agradeço ao meu orientador José Eduardo Gonçalves pela ajuda neste trabalho, pelos ensinamentos e pela amizade.

A minha família, pelo apoio e suporte.

Aos amigos que me acompanharam nestes anos de mestrado Ricardo, Mayra, Ellen, Luiza, Cesar, Steffany, Anderson, Cíntia, Adelita, Jhonathas, Alinne, Bruna, Gabriela, João, Juliane, Juliana e ao Pedro.

E por fim, a todos os membros do PPGERHA que de alguma maneira contribuíram para a realização deste mestrado.

*“A condição natural dos corpos não é o repouso,
mas o movimento”*

Galileu Galilei

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	11
LISTA DE FIGURAS.....	12
RESUMO.....	18
ABSTRACT	21
1. INTRODUÇÃO	22
1.1 OBJETIVOS GERAIS.....	23
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	24
1.3 IMPORTÂNCIA E APLICAÇÕES	24
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	25
2.1 ESTUÁRIOS.....	25
2.2 CIRCULAÇÃO GERAL DA ATMOSFERA.....	29
2.2.1 Sistemas Frontais.....	30
2.2.2 Frente Fria.....	32
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	35
4. MATERIAIS E MÉTODOS	39
4.1 CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO	39
4.1.1 O Complexo Estuarino de Paranaguá.....	39
4.1.2 Identificação dos Sistemas Frontais e Forçantes do Modelo Atmosférico.....	42
4.1.3 Forçantes do Modelo Hidrodinâmico	43
4.1.3.1 Maré	44
4.1.3.2 Vento	45
4.2 MODELOS	45
4.2.1 O Weather Research & Forecasting Model – WRF	45
4.2.1.1 Sistemas de Modelagem do WRF	46
4.2.1.2 Aninhamento de Grades.....	48

4.2.1.3 Equações Governantes	50
4.2.2 Delft3d	52
4.2.2.1 Delft3d-flow	52
4.2.2.1.1 Equações Hidrodinâmicas do Delft3d-flow	53
4.3 IMPLEMENTAÇÃO DOS MODELOS	58
4.3.1 Implementação do Weather Research & Forecasting Model – WRF	58
4.3.1.1 A Estrutura do WRF	58
4.3.1.2 Pré-processamento WRF	59
4.3.1.2.1 WRF Portal	59
4.3.1.2.2 GFS	62
4.3.1.2.3 Pós-processamento	62
4.3.2 Implementação do DELFT3D	62
4.3.2.1 Grade Numérica	63
4.3.2.2 Propriedades da Grade Numérica	64
5. CARACTERIZAÇÃO DOS CENÁRIOS	69
5.1 ANÁLISE DE FRENTES FRIAS	69
5.2 CENÁRIOS	73
5.2.1 Cenário 01 - verão	73
5.2.2 Cenário 02 - inverno	78
6. ANÁLISES PRELIMINARES	83
6.1 MARÉ	83
6.2 TESTES DELFT3D	93
7. RESULTADOS	98
7.1 RESULTADOS WRF	98
7.1.1 Resultados WRF Cenário 1	98
7.1.2 Resultados WRF Cenário 2	105

7.2 RESULTADOS DELFT3D	112
7.2.1 Resultados DELFT3D Cenário 1	113
7.2.2 Resultados DELFT3D Cenário 2	117
7.2.3 Comparações entre os Cenários.....	120
8. DISCUSSÕES E CONCLUSÕES	122
9. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	126
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	127

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. Principais tipos de frentes e suas representações.....	31
TABELA 2. Sequência de tempo associada à passagem de frentes frias	33
TABELA 3. Principais constantes harmônicas para o Complexo Estuarino de Paranaguá.	44
TABELA 4. Características do domínio utilizado nas simulações com o modelo WRF	60
Tabela 5. Parâmetros utilizados no modelo hidrodinâmico Delft3D.....	68
Tabela 6. Quantidade de sistemas frontais frios que passaram pelo CEP nos anos de 2013, 2014 e 2015.	71
TABELA 7. Principais constantes harmônicas da maré para Paranaguá obtidas através da análise harmônica de dados observados.	84
TABELA 8. Principais constantes harmônicas extraídas a partir da análise harmônica da série de dados gerada pelo modelo hidrodinâmico Delft3D.	89
TABELA 9. Análises estatísticas entre a série de dados de pressão atmosférica simulados e observados para o Cenário 1.	100
TABELA 10. Análises estatísticas entre a série de dados de velocidade do vento simulados e observados para o Cenário 1.	101
TABELA 11 Análises estatísticas entre a série de dados de pressão atmosférica simulados e observados para o Cenário 2.	1066
TABELA 12. Análises estatísticas entre a série de dados de velocidade do vento simulados e observados para o Cenário 2.	1077
TABELA 13. Análises estatísticas dos Cenários 1 e 2.	1211

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. Representação esquemática de um estuário, conforme definição de Fairbridge (1980). Fonte: Da Silva, 2000.....	26
FIGURA 2. Representação esquemática de um estuário, conforme definição de Kjerfve (1990). Fonte: Adaptado de Miranda e colaboradores, 2002.....	27
FIGURA 3. Padrões de circulação estuarina. A) Estuário do tipo Cunha Salina; B) Estuário do tipo Parcialmente Misturado; C) Estuário do tipo Bem Misturado. Fonte: Pritchard (1967).	29
FIGURA 4 Modelo de Circulação Geral da Atmosfera. Fonte: Lutgens & Tarbuck, 2001.....	30
FIGURA 5. Carta sinótica da região sul do Brasil, de 19 de agosto de 2015. “A” indica uma zona de alta pressão e “B” uma zona de baixa pressão. Linha em azul representa uma frente fria, linha em roxo uma frente oclusa e a linha em vermelho uma frente quente. Fonte: SIMEPAR, 2015.....	32
FIGURA 6. Esquema de formação de uma frente fria. Tipos de nuvens: Ac: Altocumulus; Cs: Cirrostratus; Ci: Cirrus; Cb: Cumulonimbus. Fonte: Adaptado de Ahrens, 2007.....	33
FIGURA 7. Complexo Estuarino de Paranaguá. Fonte: Adaptado de Mayerle et al., 2015.....	40
FIGURA 8. Carta sinótica referente ao dia 30/01/2015 às 00h00min. Linhas em azul e vermelho indicam sistemas frontais frios e quente, respectivamente. Fonte: Marinha do Brasil, 2015.....	43
FIGURA 9. Níveis verticais (coordenada sigma pressão) utilizados pelo ARW. Fonte: Skamarock <i>et al.</i> , 2008.....	47
FIGURA 10. Grid horizontal e vertical no formato (Arakawa-C) utilizado pelo ARW. Fonte: Skamarock, 2008.....	48
FIGURA 11. Exemplos de aninhamentos de grade permitidos no WRF.	49
FIGURA 12. Exemplos de grades aninhadas do tipo C. Fonte: Adaptado de Conselvan, 2006.....	50
FIGURA 13. Definição do nível da água (ζ), profundidade (h) e profundidade total (H). Fonte: Hydraulics, 2014.....	54
FIGURA 14. Exemplo de uma grade em coordenadas σ . Fonte: Hydraulics, 2014...	54

FIGURA 15. Exemplos de Coeficientes de Arrasto do Vento aplicados no modelo hidrodinâmico Delft3D.....	57
FIGURA 16. Etapas de processamento do modelo atmosférico WRF. Fonte: Skamarock, 2008.....	58
FIGURA 17. Domínio utilizado nas simulações com o modelo WRF.	60
FIGURA 18. Imagem de satélite do Complexo Estuarino de Paranaguá. Fonte: Google Earth.....	63
FIGURA 19. Grade e linha de costa gerada para a área do Complexo Estuarino de Paranaguá.	64
FIGURA 20. Ortogonalidade da grade numérica para o CEP.....	65
FIGURA 21. Resolução da grade numérica para o CEP.	66
FIGURA 22. Batimetria (metros) da grade numérica para o CEP.....	67
FIGURA 23. Carta náutica utilizada para gerar a batimetria utilizada no modelo delft3D.	67
FIGURA 24. Pressão atmosférica da estação meteorológica de Paranaguá do ano de 2013. Setas azuis indicam a passagem de alguns dos sistemas frontais frios, caracterizados pela queda de pressão, no CEP.	69
FIGURA 25. Pressão atmosférica da estação meteorológica de Paranaguá do ano de 2014.....	70
FIGURA 26. Pressão atmosférica da estação meteorológica de Paranaguá do ano de 2015.....	71
FIGURA 27. Intensidade do vento estação de Paranaguá para o ano de 2013. Setas indicam picos de velocidade do vento (acima de 8,0 m/s) ocorridas em conjunto com a passagem de sistemas frontais frios.	72
FIGURA 28. Carta sinótica demonstrando a passagem de um sistema frontal frio sobre o complexo estuarino de Paranaguá (quadrante B) as 0 horas do dia 30 de janeiro de 2015.	74
FIGURA 29. Velocidade do Vento Estação Paranaguá de 14/01/2015 a 27/02/2015. Em vermelho ponto de velocidade máxima durante a passagem de um sistema frontal no CEP.....	75
FIGURA 30. Velocidade do Vento Estação Ilha do Mel de 14/01/2015 a 27/02/2015. Em vermelho ponto de velocidade máxima durante a passagem de um sistema frontal no CEP.	76

FIGURA 31. Pressão do ar estação Ilha do Mel do período de 15/01/2015 a 15/02/2015.....	77
FIGURA 32. Pressão do ar estação Ilha do Mel para o cenário 01.	77
FIGURA 33. Pressão do ar estação Paranaguá do período de 15/01/2015 a 15/02/2015.....	78
FIGURA 34. Pressão do ar estação Paranaguá para o cenário 01.	78
FIGURA 35. Carta sinótica demonstrando a passagem de um sistema frontal frio sobre o complexo estuarino de Paranaguá (quadrante B) as 0 horas do dia 20 de agosto de 2015.	79
FIGURA 36. Velocidade do Vento observada na estação meteorológica de Paranaguá no período de 18/08/2015 a 21/08/2015.	80
FIGURA 37. Pressão do ar estação Ilha do Mel correspondente ao mês de agosto de 2015.....	81
FIGURA 38. Pressão do ar estação Ilha do Mel correspondente ao Cenário 02.	81
FIGURA 39. Pressão do ar estação Paranaguá correspondente ao mês de agosto de 2015.	82
FIGURA 40. Pressão do ar estação Paranaguá correspondente ao Cenário 02.	82
FIGURA 41. Nível de maré observada em Paranaguá no período de 23/07/1996 a 22/08/1996.....	85
FIGURA 42. Previsão do nível de maré para Paranaguá para o período de 23/07/1996 a 22/08/1996.....	86
FIGURA 43. Previsão e nível de maré observada em Paranaguá para o período de 23/07/1996 a 22/08/1996.....	86
FIGURA 44. Ruído (ação de outras forçantes diferentes da maré) presente nas variações de nível da maré para o período de 23/07/1996 a 22/08/1996.....	87
FIGURA 45. Velocidade do vento observada na estação meteorológica de Paranaguá no período de 23/07/1996 a 22/08/1996.	88
FIGURA 46. Grade do modelo hidrodinâmico Delft3D demonstrando a localização do ponto de observação em Paranaguá.	90
FIGURA 47. Nível de maré modelada para Paranaguá no período de 28/01/2015 a 28/02/2015.....	91
FIGURA 48. Previsão do nível de maré para Paranaguá para o período de 28/01/2015 a 28/02/2015.....	91

FIGURA 49. Erro presente nas variações de nível da maré para o período de 23/07/1996 a 22/08/1996.....	92
FIGURA 50. Nível de maré modelada para Paranaguá e erro embutido nas simulações.....	93
FIGURA 51. Campo de Vento Nordeste.....	94
FIGURA 52. Campo de Vento Sudeste.....	94
FIGURA 53. Campo de correntes vento 45°.....	95
FIGURA 54. Influência do vento com direção nordeste e intensidade de 10 m/s durante 30 dias na hidrodinâmica do CEP.....	96
FIGURA 55. Influência do vento com direção sudeste e intensidade de 10 m/s durante 30 dias na hidrodinâmica do CEP.....	97
FIGURA 56. Imagem de satélite demonstrando o ponto de observação do modelo WRF em Paranaguá e a localização da estação meteorológica de Paranaguá.....	98
FIGURA 57. Pressão atmosférica gerada pelo modelo WRF e medida na estação meteorológica de Paranaguá – Cenário 1.....	99
FIGURA 58. Coeficiente de Correlação Linear de Pearson entre as séries de dados de pressão atmosférica simuladas pelo WRF e os dados observados na estação meteorológica de Paranaguá – Cenário 1.....	100
FIGURA 59. Velocidade do vento gerada pelo modelo WRF para a região de Paranaguá e Velocidade do vento observada na estação meteorológica de Paranaguá – Cenário 1.....	101
FIGURA 60. Campo de vento simulado 29/01/2015 06:00-GMT.....	103
FIGURA 61. Campo de vento simulado 29/01/2015 12:00-GMT.....	103
FIGURA 62. Campo de vento simulado 29/01/2015 15:00-GMT.....	103
FIGURA 63. Campo de vento simulado 29/01/2015 18:00-GMT.....	103
FIGURA 64. Campo de vento simulado 29/01/2015 21:00-GMT.....	103
FIGURA 65. Campo de vento simulado 30/01/2015 03:00-GMT.....	103
FIGURA 66. Campo de pressão simulado 29/01/2015 06:00-GMT.....	104
FIGURA 67. Campo de pressão simulado 29/01/2015 12:00-GMT.....	104
FIGURA 68. Campo de pressão simulado 29/01/2015 15:00-GMT.....	104
FIGURA 69. Campo de pressão simulado 29/01/2015 06:00-GMT.....	104
FIGURA 70. Campo de pressão simulado 29/01/2015 12:00-GMT.....	104
FIGURA 71. Campo de pressão simulado 29/01/2015 15:00-GMT.....	104

FIGURA 72. Pressão atmosférica simulada pelo modelo WRF e observada na estação meteorológica de Paranaguá – Cenário 2	105
FIGURA 73. Coeficiente de Correlação Linear de Pearson entre as séries de dados de pressão atmosférica simuladas pelo WRF e os dados observados na estação meteorológica de Paranaguá – Cenário 2	106
FIGURA 74. Velocidade do vento simulada pelo modelo WRF e observada na estação para a região de Paranaguá – Cenário 2	107
FIGURA 75. Campo de vento simulado 18/08/2015 18:00-GMT	109
FIGURA 76. Campo de vento simulado 19/08/2015 06:00-GMT	109
FIGURA 77. Campo de vento simulado 19/08/2015 12:00-GMT	109
FIGURA 78. Campo de vento simulado 19/08/2015 18:00-GMT	109
FIGURA 79. Campo de vento simulado 20/08/2015 00:00-GMT	109
FIGURA 80. Campo de vento simulado 20/08/2015 03:00-GMT	109
FIGURA 81. Campo de vento simulado 20/08/2015 06:00-GMT	110
FIGURA 82. Campo de vento simulado 20/08/2015 09:00-GMT	110
FIGURA 83. Campo de vento simulado 20/08/2015 12:00-GMT	110
FIGURA 84. Campo de pressão simulado 18/08/2015 18:00-GMT	110
FIGURA 85. Campo de pressão simulado 19/08/2015 06:00-GMT	110
FIGURA 86. Campo de pressão simulado 19/08/2015 12:00-GMT	110
FIGURA 87. Campo de pressão simulado 19/08/2015 18:00-GMT	111
FIGURA 88. Campo de pressão simulado 20/08/2015 00:00-GMT	111
FIGURA 89. Campo de pressão simulado 20/08/2015 03:00-GMT	111
FIGURA 90. Campo de pressão simulado 20/08/2015 06:00-GMT	111
FIGURA 91. Campo de pressão simulado 20/08/2015 09:00-GMT	111
FIGURA 92. Campo de pressão simulado 20/08/2015 12:00-GMT	111
FIGURA 93. Localização do ponto de grade escolhido para utilizar os dados de velocidade e direção do vento simulados pelo WRF como forçantes do Delft3D	112
FIGURA 94. Velocidade Horizontal da Componente U simulada para o Cenário 1	113
FIGURA 95. Velocidade Horizontal da Componente V simulada para o Cenário 1	114
FIGURA 96. Nível de água simulado para região de Paranaguá - Cenário 1	115

FIGURA 97. Campo de Corrente simulado para o dia 29/01/2015 - 21:00 horas (GMT) – antes da entrada da frente fria	116
FIGURA 98. Campo de Corrente simulado para o dia 30/01/2015 - 21:00 horas (GMT) – após a entrada da frente fria	116
FIGURA 99. Velocidade Horizontal da Componente U simulada para o Cenário 2	117
FIGURA 100. Velocidade Horizontal da Componente V observada para o Cenário 2.....	118
FIGURA 101. Nível de água simulado para região de Paranaguá - Cenário 2.....	118
FIGURA 102. Campo de Corrente simulado para o dia 19/08/2015 21:00 horas (GMT) – no dia de entrada da frente fria	119
FIGURA 103. Campo de Corrente simulado para o dia 20/08/2015 09:00 horas (GMT) – após a passagem da frente fria	120

LISTA DE SÍMBOLOS

η – Coordenada sigma.

P_h - Pressão em cada nível.

P_{top} - Pressão no topo da atmosfera (constante).

$\mathbf{v} = (u, v, w) \rightarrow$ Velocidade.

$\theta \rightarrow$ Temperatura potencial.

$\phi = gz \rightarrow$ Geopotencial.

$p \rightarrow$ Pressão.

$\alpha = \frac{1}{\rho} \rightarrow$ Inverso da densidade.

$\gamma = \frac{c_p}{c_v}$

$R_d \rightarrow$ Constante do gás para ar seco.

$p_0 \rightarrow$ Pressão de referência.

$\mathbf{V} = \mu\mathbf{v} = (U, V, W)$.

$\Theta = \mu\theta$.

F_U, F_V, F_W e $F_\Theta \rightarrow$ Termos forçantes devido a física do modelo, mistura turbulenta, projeções esféricas e a rotação da Terra.

$z \rightarrow$ Coordenada vertical no espaço físico (m).

$\zeta \rightarrow$ Elevação da superfície livre acima do plano de referência (m).

$d \rightarrow$ Profundidade da coluna d'água abaixo do plano de referência (m).

$H \rightarrow$ Profundidade total da coluna d'água (m).

$x, y, z \rightarrow$ Coordenadas espaciais.

$u, v, w \rightarrow$ Componentes de velocidade nas direções x, y e z ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).

$t \rightarrow$ Tempo (s).

$f \rightarrow$ Parâmetro de Coriolis $f = 2\Omega\text{seno}\theta$, onde Ω é a taxa de rotação e θ a latitude.

$g \rightarrow$ Aceleração da gravidade (m/s^2).

$H \rightarrow$ Altura da coluna d'água (m).

$\rho \rightarrow$ Densidade do fluido ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$).

$P \rightarrow$ Pressão hidrostática ($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$).

ν_H e $\nu_V \rightarrow$ Viscosidade turbulenta na horizontal e na vertical, respectivamente.

$\rho_a \rightarrow$ Densidade do ar.

U_{10} – Velocidade do vento a 10 metros da superfície.

C_d – Coeficiente de arrasto do vento (dependente de U_{10})

C_d^i – Coeficientes de arrasto do vento definidos pelo usuário, para as velocidades do vento U_{10}^i ($i = A, B, C$).

U_{10}^i – Velocidades do vento definidas pelo usuário ($i = A, B, C$).

RESUMO

O principal objetivo deste trabalho foi analisar a resposta da hidrodinâmica do Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP) devido a ação do vento oriundo da passagem de sistemas frontais frios na região. A simulação dos campos de vento foi efetuada com auxílio do modelo atmosférico Weather Research and Forecast Model (WRF), inicializado com dados meteorológicos do modelo global GFS. Os campos de vento, do modelo WRF, em dois cenários distintos, inverno e verão, foram utilizados como forçantes nas simulações da hidrodinâmica do CEP com o modelo hidrodinâmico Delft3D. A comparação dos resultados dos campos atmosféricos gerados pelo modelo com dados da estação meteorológica de Paranaguá mostrou que o WRF reproduziu o momento da entrada da frente fria e sua duração. Além disso, o modelo apresentou bom desempenho na representação dos gradientes de pressão no momento da entrada do sistema frontal. Testes de sensibilidade, utilizando o modelo hidrodinâmico, demonstraram que a maré é o fator predominante nas variações de níveis do estuário, porém a ação de outras forçantes também desempenha um papel importante na hidrodinâmica estuarina, podendo causar alterações de até 0,40 m no nível médio de água. Em ambos os cenários o campo de correntes demonstrou que após a entrada da frente fria há mudança na direção das correntes costeiras e estuarinas, que passam a seguir a direção do sistema frontal fluindo em direção ao Norte. Como pôde ser observado, tanto nos testes preliminares, com a imposição de ventos paralelos a linha de costa, quanto em condições mais realistas, com a utilização de campos de vento gerados pelas passagens de sistemas frontais, o principal efeito ocorrido foi o bombeamento de água para o interior do estuário devido ao efeito de Coriolis associado com a direção Sul predominante dos campos de vento gerados pelas frentes frias.

Palavras-chave: Frentes frias, modelagem atmosférica, modelagem hidrodinâmica, WRF, Delft3D, CEP.

ABSTRACT

The main objective of this study was to analyze the response of the hydrodynamics of the estuarine complex of Paranaguá (CEP) due to the action of wind fields, generated by the passages of cold fronts in the region. The simulation of wind fields was performed with the aid of the Weather Research and Forecast Model (WRF), initialized with meteorological data from the global model GFS. The wind fields, from the WRF model, in two different scenarios, winter and summer, were used as forcing to the hydrodynamic model Delft3D. Comparison of results of atmospheric fields generated by the model with data from the weather station of Paranaguá showed that the WRF reproduced accurately the time of the cold front entrance and its duration. In addition, the model showed good performance in the representation of the pressure gradients for the front entry system. Sensitivity tests using the hydrodynamic model showed that the tide is the dominant factor in variations in the estuary levels, but the other forcing action also plays an important role in estuarine hydrodynamics. In both scenarios the current field has shown that after the cold front entrance there is a change in the direction of coastal and estuarine currents, which will follow the direction of the front to northward. As can be observed, both in preliminary tests, with the imposition of winds parallel to the coastline, as in more realistic conditions, with the use of wind fields generated by frontal systems, the main effect was the entrance of water into the estuary due to the Coriolis effect associated with the prevailing direction of the wind (South) generated by the cold fronts.

Keywords: cold fronts, atmospheric modeling, hydrodynamic modeling, WRF, Delft3D, CEP.

1. INTRODUÇÃO

Regiões costeiras são áreas de grande interesse a ocupação humana, devido à riqueza e diversidade de seus recursos naturais. Em consequência disso, grande centros urbanos foram se desenvolvendo nestes locais, o que hoje representa mais da metade da população do nosso país vivendo a menos de 200 km da costa (LOPES, 2010). Entre os diversos ambientes costeiros os estuários são os mais propícios ao desenvolvimento de áreas urbanas.

Zonas estuarinas são áreas de grande importância econômica e ecológica devida suas características morfológicas e hidrodinâmicas. Estes corpos d'água apresentam áreas abrigadas possibilitando o estabelecimento de instalações portuárias, navais e comerciais, são berçários ecológicos, zonas de migração de diferentes espécies, tanto para reprodução quanto para alimentação e possuem uma cadeia alimentar ativa devido à alta concentração de nutrientes (LOPES, 2010).

O crescimento, muitas vezes desordenado, desses centros urbanos pode causar efeitos prejudiciais ao meio ambiente como o desmatamento de áreas de manguezais, a pesca predatória, o despejo de resíduos domésticos e industriais e as dragagens associadas às atividades portuárias. Os efeitos destas atividades podem ser observados na poluição das águas e sedimentos, redução da produtividade pesqueira, limitações nas áreas de navegação e alterações na morfologia natural e na hidrodinâmica local (JIANG *et al.*, 2001; LOPES, 2010).

Um aspecto fundamental no equilíbrio de um ecossistema estuarino está relacionado a todo o processo de circulação da água, chamado de hidrodinâmica estuarina. A caracterização hidrodinâmica de estuários fornece subsídios para uma melhor compreensão de fenômenos físicos, tais como circulação de massas de água, frentes oceânicas, dispersão de nutrientes e sedimentos, além de fornecer informações importantes para projetos relacionados a temas como poluição, clima, atividades portuárias e pesqueiras (RIBAS, 2004).

A dinâmica física dos estuários representa um processo vital na manutenção destes ecossistemas e está vinculada principalmente a variáveis meteorológicas (ventos, chuvas), oceanográficas (ondas, marés) e geológicas (tipo de sedimentos) (RIBAS, 2004). Aos efeitos destas variáveis somam-se as influências exercidas pela geometria e batimetria do corpo estuarino e pela circulação da região costeira adjacente (MIRANDA, 1990).

Dentre os fenômenos meteorológicos destacam-se os sistemas frontais. A passagem de um sistema frontal sobre uma determinada região é acompanhada por instabilidade atmosférica, alternâncias de tipos de tempo e, genericamente, ocorrências de precipitações (MENDONÇA, 2007). A ocorrência destes sistemas causam alterações significativas em toda a hidrodinâmica costeira.

Neste sentido, a utilização de modelos numéricos do oceano e da atmosfera para a geração de simulações meteorológicas, tem possibilitado substantivo aumento na capacidade de análise de eventos atmosféricos e oceânicos. Conhecer antecipadamente as condições de circulação oceânica é de suma importância para aperfeiçoar e permitir a definição de estratégias de ação em casos de acidentes com vazamento de poluentes, realização de atividades portuárias, operações navais, atividades marítimas comerciais e de proteção costeira.

1.1 OBJETIVOS GERAIS

Analisar a circulação oceânica do Complexo Estuarino de Paranaguá – PR, quando ocorre a passagem de sistemas frontais frios.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Configurar o modelo atmosférico The Weather Research & Forecasting Model (WRF), para a região do Complexo Estuarino de Paranaguá – PR
2. Utilizar os dados de vento (componentes U e V) modelados pelo WRF como entrada do modelo hidrodinâmico Delft3D.
3. Avaliar o desempenho do modelo atmosférico WRF na reprodução dos sistemas frontais frios.

1.3 IMPORTÂNCIA E APLICAÇÕES

A importância da utilização de modelos atmosféricos e hidrodinâmicos está na possibilidade de simular os padrões de circulação costeira de diferentes regiões. Cada vez mais estes modelos vem sendo utilizados, com caráter preditivo, para avaliações de cenários ambientais futuros ou em tempo real, que auxiliem tomadas de decisão relativas à gestão ambiental costeira referente a aspectos preventivos como também corretivos. A exemplo (CAMARGO, 1998; FRAZÃO, 2003; SCUDELARI *et. al.*, 2008):

1. Realização de planos de contingência em casos onde há impactos causados por lançamentos de efluentes;
2. Casos de derramamento de óleo;
3. Melhorarias em operações portuárias;
4. Adequação das operações de dragagens;
5. Análise de erosão e assoreamento de canais e da linha de costa.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ESTUÁRIOS

Diversas definições são associadas a estuários. Segundo Pritchard (1967) do ponto de vista físico, estuários podem ser conceitualmente definidos como corpos de água costeiros semi-fechados, que possuem uma conexão livre com o mar aberto e nos quais a água do mar é mensuravelmente diluída com água doce derivada da drenagem terrestre.

Do ponto de vista biológico os estuários são classificados como uma zona terminal de um rio que desagua em um mar com maré, possuindo áreas de água salgada variando a respectiva extensão com o caudal fluvial de montante, são regiões onde as correntes de maré podem propagar-se em zonas de água doce (CASPER, 1967).

Para da Silva (2000), uma definição que engloba tanto a definição física quanto a biológica é a proposta por Fairbridge (1980). “Um estuário é uma reentrância de mar em um vale fluvial, estendendo-se até ao limite da propagação da maré, e divisível em três setores (Fig. 1): 1) o baixo estuário, ou zona marítima, com ligação aberta com o mar; 2) o estuário médio, onde ocorre mistura intensa de água doce e salgada; e 3) o estuário superior ou fluviomarítimo, com água doce, mas sujeito à influência da maré”.

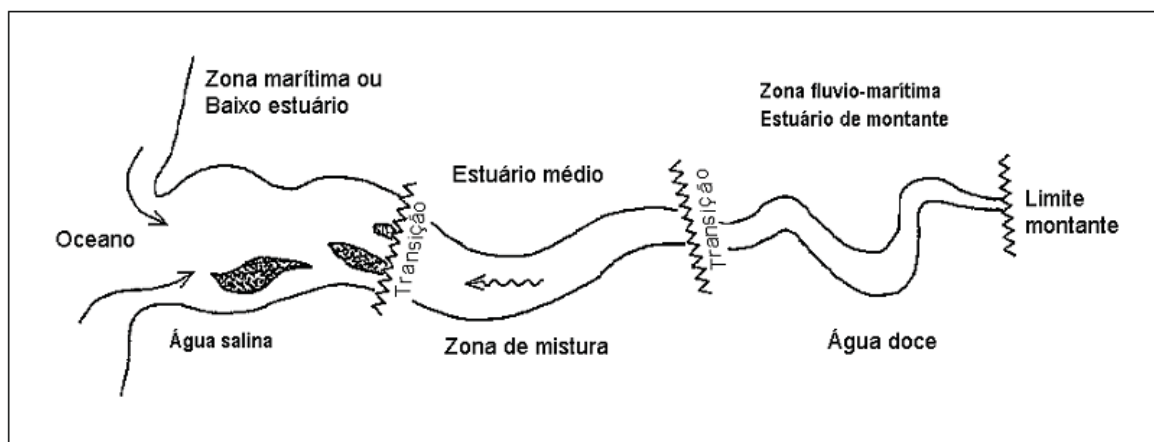


FIGURA 1. Representação esquemática de um estuário, conforme definição de Fairbridge (1980). Fonte: Da Silva, 2000.

Na zona marítima, a água é predominantemente salgada, embora possa ter variações associadas à presença de água doce, já que é ainda uma zona de mistura que pode se estender para a zona costeira adjacente. No estuário médio, ocorre a transição entre a água de características oceânicas até água de salinidade $< 0,5$. Na zona fluvio-marítima a composição química da água é condicionada pelas descargas do rio. Os limites entre estes setores são variáveis, em função das variações de caudal do rio e do tipo de maré (DA SILVA, 2000).

Kjerfve (1990), com base na gênese geológica desses ambientes costeiros e no fato de que os mesmos apresentam vários estágios de desenvolvimento em diferentes escalas de tempo, propôs uma definição para o sistema estuarino, como sendo: um ambiente costeiro, com conexão restrita ao oceano adjacente, a qual permanece aberta pelo menos intermitentemente. O autor ainda dividiu o sistema em três regiões distintas (Fig. 2):

1) Zona de maré do rio (ZR), a parte fluvial contendo apenas água doce, mas sujeita à influência da maré;

2) Zona de mistura (ZM), o estuário propriamente dito, que se caracteriza pela mistura de massas de água distintas (doce e salgada) e conseqüentemente por uma acentuada variação espacial e temporal das propriedades. Esta zona estende-se

entre a ZR e a entrada do estuário (desembocadura), em alguns casos esta última pode ser limitada fisicamente por uma barra de areia de maré enchente ou um delta de maré vazante;

3) Zona costeira (ZC), a região costeira do mar adjacente, que se caracteriza por uma maior turbidez se comparada a ZR e a ZM, horizontalmente essa zona se estende até a chamada zona frontal.

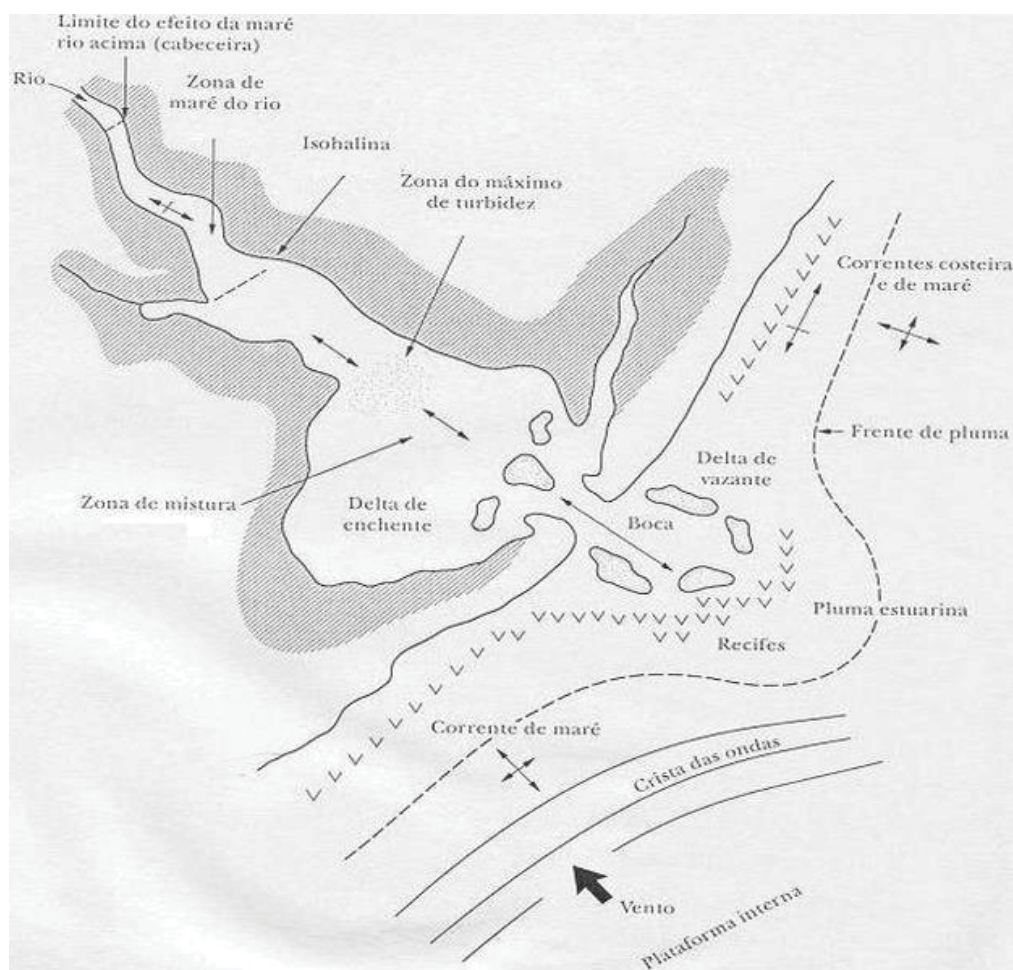


FIGURA 2. Representação esquemática de um estuário, conforme definição de Kjerfve (1990). Fonte: Adaptado de Miranda e colaboradores, 2002.

Com relação aos processos de mistura, a diferença de densidade entre a água doce e salgada dentro dos estuários pode gerar gradientes de estratificação

horizontais e/ou verticais. Segundo Pritchard (1967) os estuários podem ser classificados em três tipos de acordo com os padrões de mistura (Fig. 3):

- A) Cunha salina: são estuários altamente estratificados, típicos de regiões onde ocorre o domínio da descarga fluvial. A água doce continental, por ser menos densa, tende a se manter na superfície, movendo-se sempre em direção ao oceano. Como a água salgada possui maior densidade, ela penetra no estuário pelas camadas do fundo, gerando uma diferença acentuada no perfil vertical de salinidade e um aumento gradativo da mesma em direção ao oceano;
- B) Parcialmente misturado: estuários onde o volume de água no seu interior não é totalmente misturado. A força da maré e a descarga fluvial possuem forças equivalentes que irão gerar turbulência interna. Esse processo gera uma mistura entre as águas de origem continental e marinha, fazendo com que haja um aumento da salinidade de maneira gradual tanto na vertical quanto na horizontal.
- C) Bem misturado: estuários típicos de ambientes rasos, onde a descarga fluvial é muito pequena, havendo apenas ou predominantemente influência da maré. Este ambiente não apresenta gradiente vertical de salinidade, ou em alguns casos é muito fraco. O gradiente longitudinal de salinidade é observado no sentido estuário abaixo, porém é menor do que em estuários parcialmente misturados.

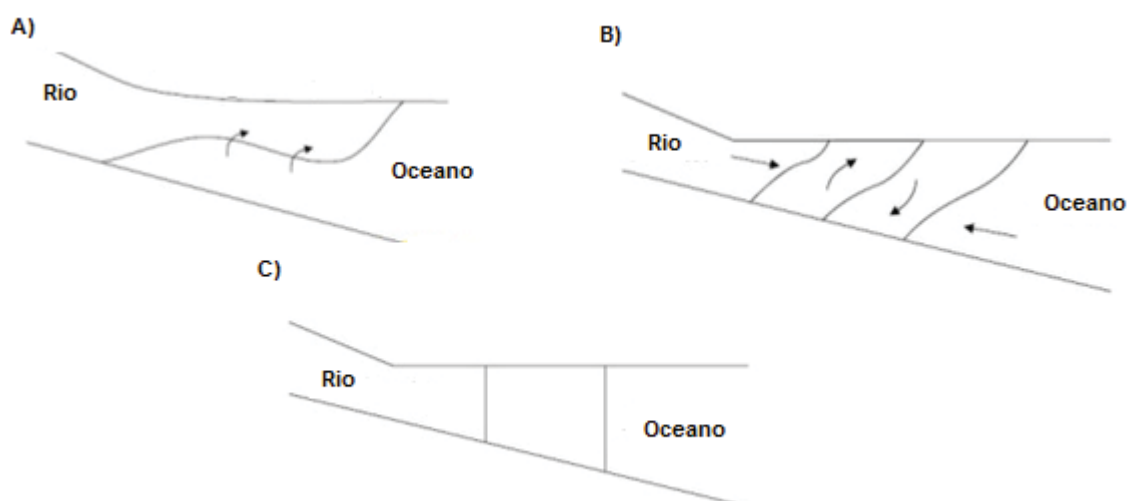


FIGURA 3. Padrões de circulação estuarina. A) Estuário do tipo Cunha Salina; B) Estuário do tipo Parcialmente Misturado; C) Estuário do tipo Bem Misturado. Fonte: Pritchard (1967).

2.2 CIRCULAÇÃO GERAL DA ATMOSFERA

A Circulação Geral da Atmosfera consiste de um sistema de correntes de ar de macro escala sobre a Terra, as quais realizam trocas horizontais e verticais entre as massas de ar. Este movimento é originado devido a fatores astronômicos e geofísicos, por exemplo, diferenças na distribuição da radiação solar devido aos movimentos da Terra, e também por fatores internos (composição e estrutura da atmosfera, distribuição dos oceanos e dos continentes, propriedades da superfície adjacente, relevo, entre outros). As correntes principais da Circulação Geral realizam o mecanismo de transporte de calor e umidade, devido a isto a Circulação Geral da Atmosfera é considerada um fator de formação do clima (FEDOROVA, 1999).

Sobre a região do equador é observado ar quente, convergência do vento e movimentos ascendentes. O ar menos denso sobe até aproximadamente 8 – 12 km e desloca-se em direção aos polos. Nas regiões subtropicais o ar desce originando divergência do vento em baixos níveis da atmosfera e os anticiclones subtropicais. Esta circulação assemelha-se a uma enorme célula, comumente designada Célula

superfície de descontinuidade ou de transição é estreita e inclinada e os efeitos meteorológicos nesta região apresentam variação abrupta. O processo de origem das frentes denomina-se de *frontogênese* e o processo de dissipação é chamado de *frontólise* (DANNI-OLIVEIRA & MENDONÇA, 2007).

Um sistema frontal clássico é composto por um ramo frio, um ramo quente e um centro de baixa pressão em superfície, denominado ciclone (ANDRADE, 2005). Acima de cerca de 4500 metros as diferenças entre as duas massas de ar tornam-se insignificantes e as nuvens e os padrões de precipitação não são facilmente atribuíveis a um tipo frontal ou outro. Portanto, a frente possui mais significância nas camadas inferiores da atmosfera (LEWIS, 2012).

As frentes avançam sobre a superfície em forma de arco, cuja origem é um centro de alta pressão e a ponta do arco corresponde a um centro de baixa pressão. O ponto onde a frente entra em contato com o solo é chamado de frente de superfície. A frente de superfície é a linha traçada em cartas sinóticas com diferentes cores e formas, para representar cada tipo de frente existente (Tabela 1) (Fig. 5). No hemisfério sul, as frentes frias desenham um arco que avança em direção norte com a embocadura voltada para sul, enquanto as frentes quentes traçam um desenho na forma inversa (DANNI-OLIVEIRA & MENDONÇA, 2007).

TABELA 1. Principais tipos de frentes e suas representações.

TIPO DE FRENTE	ESQUEMA DE COR	SÍMBOLO
Frente Fria	Azul	
Frente Quente	Vermelho	
Frente Oclusa	Roxo	
Frente Estacionária	Azul e Vermelho	

Fonte: Adaptado de Lewis, 2012.

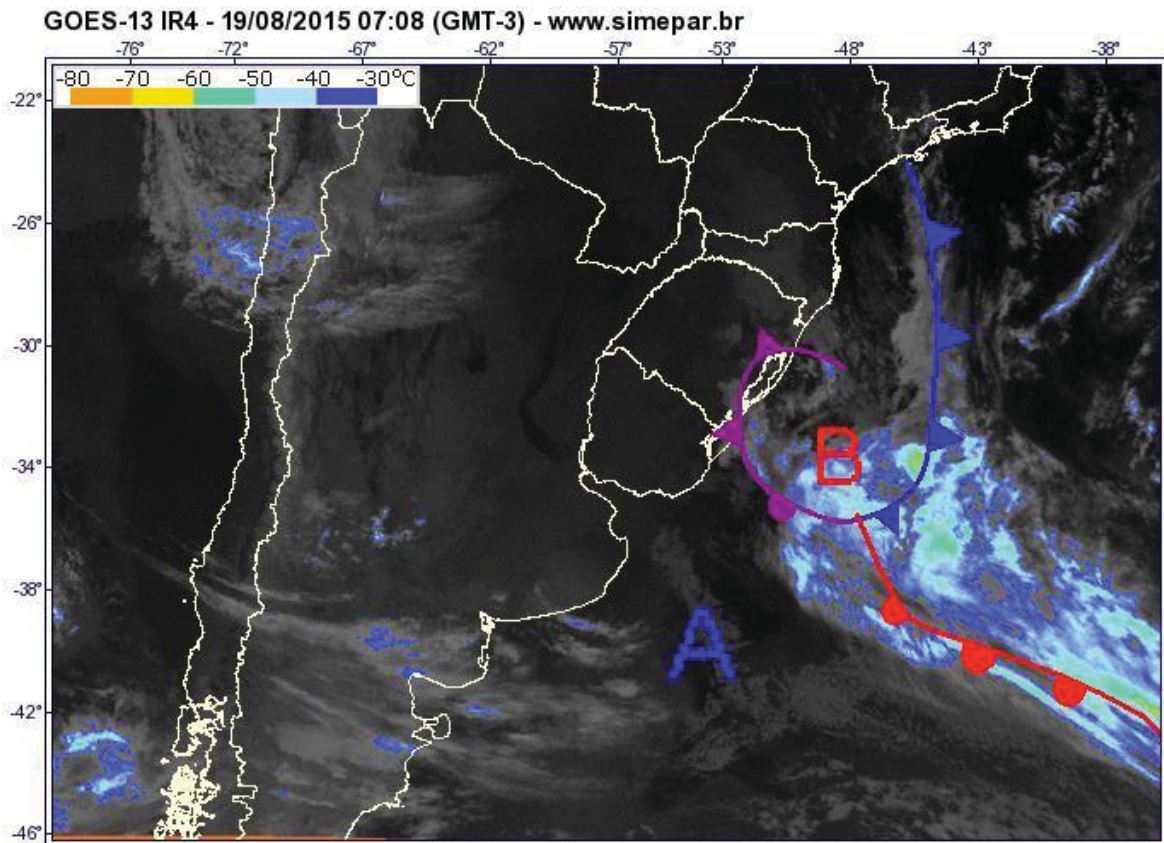


FIGURA 5. Carta sinótica da região sul do Brasil, de 19 de agosto de 2015. “A” indica uma zona de alta pressão e “B” uma zona de baixa pressão. Linha em azul representa uma frente fria, linha em roxo uma frente oclusa e a linha em vermelho uma frente quente. Fonte: SIMEPAR, 2015.

2.2.2 Frente Fria

A frente fria (Fig. 6) se forma quando uma massa de ar frio avança sobre a massa de ar quente. O ar frio mais denso empurra o ar quente para cima e para frente, fazendo-o se retirar da área, tanto por elevação quanto por advecção (DANNI-OLIVEIRA & MENDONÇA, 2007). A passagem, formação, ou intensificação de frentes frias são, em geral, associados a mudanças nas condições meteorológicas. Momentos antes da chegada de uma frente fria ocorre uma queda na pressão atmosférica e intensificação dos ventos. Após sua passagem, a pressão aumenta, a temperatura diminui e o vento muda de direção (geralmente de norte ou nordeste para de sul ou sudoeste). A sequência de tipos de tempo normalmente

experimentados durante a passagem de uma frente fria é listada na tabela 2 (MATTOS, 1986; OLIVEIRA et al., 2001).

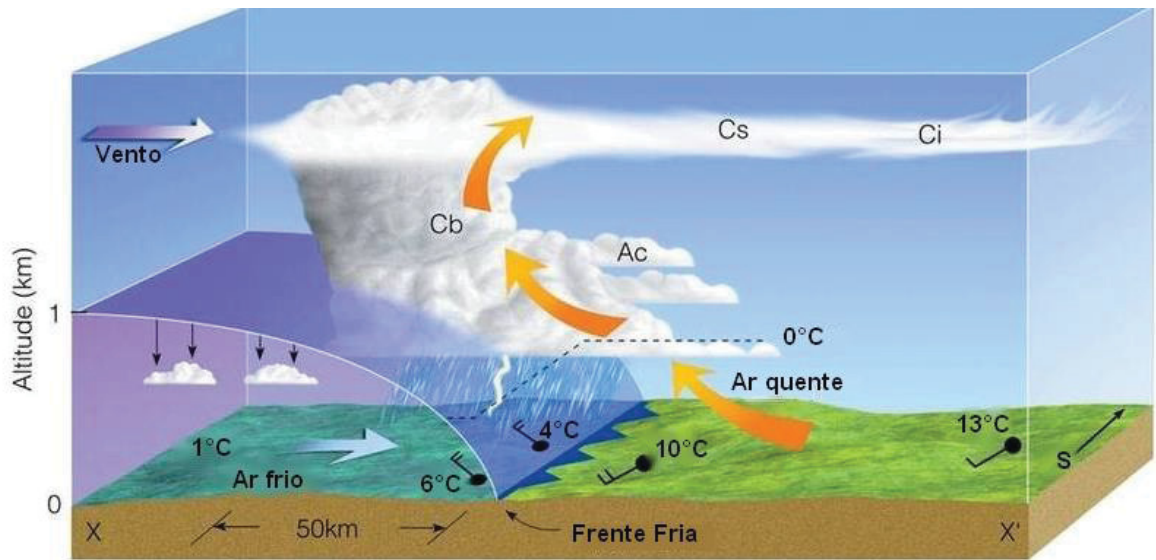


FIGURA 6. Esquema de formação de uma frente fria. Tipos de nuvens: Ac: Altostratus; Cs: Cirrostratus; Ci: Cirrus; Cb: Cumulonimbus. Fonte: Adaptado de Ahrens, 2007.

TABELA 2. Sequência de tempo associada à passagem de frentes frias (Continua).

Característica	Avançando	Na Passagem	Após a Passagem
Pressão	Queda	Aumento repentino	Aumento continua mais lentamente
Vento	Aumentando e invertendo, com ventania	Mudança repentina, às vezes com ventania	Invertendo um pouco após a intensificação, depois estável ou com mudança
Temperatura	Estável, mas diminui na área de chuva	Queda repentina	Pouca mudança, variável em áreas de pancadas de chuva

Característica	Avançando	Na Passagem	Após a Passagem
Umidade Relativa	Pode aumentar na área de precipitação	Mantêm-se na área de precipitação	Queda rápida conforme a chuva cessa
Tempo	Chuva	Chuva, frequentemente intensa, talvez com trovão e granizo.	Chuva intensa por um curto período, às vezes mais persistente, depois tempo bom com pancadas ocasionais.

Fonte: Adaptado de Lankford, 2000.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Modelos numéricos atmosféricos e oceânicos vem sendo largamente utilizado para análises da interação entre a atmosfera e a hidrodinâmica marinha. Dos trabalhos de análise da ação dos ventos na circulação marinha, que mais se aproximam do objetivo deste estudo, destacam-se os trabalhos realizados por Warner *et al.* (2012) e Cardoso & Dourado (2014).

Warner *et al.* (2012) analisaram a influência da passagem de fortes frentes frias na dinâmica costeira de todo o sudeste dos Estados Unidos. Os autores utilizaram o modelo Ocean – Atmosphere – Wave – Sediment Transport (COAWST) que utiliza o modelo de acoplamento Toolkit para a troca de variáveis de prognóstico entre os modelos oceânico ROMS, atmosférico WRF, de ondas SWAN e entre o modelo de transporte de sedimentos CSTMS. Segundo os autores, os resultados obtidos sugeriram que a passagem de frentes frias pode impactar fortemente a zona de arrebentação e na resposta da plataforma interna, agindo como uma forçante para o transporte de sedimentos no litoral.

Cardosos e Dourado (2014) utilizaram um modelo unidimensional com fechamento de segunda ordem para investigar a resposta da superfície do oceano à passagem de uma frente fria na região da Confluência Brasil-Malvinas. Segundo os autores o modelo foi capaz de reproduzir tanto o ciclo diurno, quanto o resfriamento da temperatura da superfície do mar, observado com a passagem da frente fria. Os resultados da simulação numérica mostraram um aumento de 0,2 °C no efeito do resfriamento de pele e um aprofundamento de aproximadamente 16 metros na camada de mistura oceânica com a passagem da frente fria. Essas variações foram consistentes com a mudança no balanço de energia em superfície, devido ao aumento abrupto dos fluxos turbulentos em resposta ao aumento da velocidade do vento e da diferença de temperatura entre o ar e o mar. Após a passagem da frente fria, os fluxos de calor diminuem lentamente mostrando que, se não houver a entrada de uma nova frente fria ou advecção de massa de água, a superfície do mar e o ar adjacente tendem ao equilíbrio.

Na Baía de Paranaguá poucos trabalhos utilizando modelos atmosféricos e oceânicos em conjunto foram realizados. Dentre estes é importante citar o trabalho realizado por Camargo (1998) que através do acoplamento do modelo atmosférico *Regional Atmospheric Modeling System* (RAMS) com o modelo hidrodinâmico *Princeton Ocean Model* (POM), desenvolveu um estudo numérico das circulações atmosférica e oceânica na região.

Para análise do meio atmosférico o autor utilizou um domínio inicial centrado na baía abrangendo praticamente todo o litoral das Regiões Sul e Sudeste. Segundo Camargo (1998), com a utilização deste domínio foi possível resolver as características de mesoescala da região através do aninhamento de grades e, ao mesmo tempo, pode-se efetuar a assimilação de campos analisados de escala sinótica em situações de interesse.

O autor identificou através dos resultados, uma tendência à curvatura anticiclônica durante o estabelecimento da brisa marítima, na região costeira dos Estados de RS, SP e RJ, e uma tendência à curvatura ciclônica durante o estabelecimento da brisa terrestre nestes mesmos locais; segundo Camargo (1998) essas feições exercem importante papel na propagação de sistemas frontais pelo sul-sudeste do Brasil. Para a Baía de Paranaguá, o ajuste de mesoescala do escoamento de superfície indicou a influência das feições topográficas locais no vento médio diário e nas perturbações horárias em relação ao mesmo, tendo sido detectadas deflexões de direção superiores a 90° na área estuarina, em relação à região costeira adjacente.

Para a modelagem do meio oceânico Camargo (1998) implementou o modelo POM em um domínio de pequena escala, cobrindo apenas o estuário e a região costeira adjacente, onde foi possível examinar detalhadamente a propagação das principais componentes de maré e os padrões de circulação gerados pelas marés e pelo vento local. Adicionalmente, o autor utilizou os resultados do modelo atmosférico como forçantes num estudo de caso com o modelo oceânico, de modo a permitir a inclusão de alterações na circulação marítima impostas pelo vento local. Apesar da pequena pista de vento representada no POM, foram detectadas

significativas variações do nível médio do mar, confirmando a importância das influências meteorológicas mesmo em pequena escala.

Estudos utilizando os modelos numéricos WRF e Delft na região de interesse, nos últimos anos, pode-se citar os trabalhos de Harter (2014), Ribas (2004) e Mayerle (2015).

Harter (2014) analisou a qualidade do modelo WRF para a região sul do Brasil durante o ano de 2009. Os dados modelados foram comparados com estações meteorológicas do INMET localizadas em Curitiba e Paranaguá no Paraná, São José e Indaial em Santa Catarina e Passo Fundo e Rio Grande no Rio Grande do Sul. Os resultados demonstraram que os campos previstos pelo WRF, para o período e localidades analisadas, apresentam maior previsibilidade na seguinte ordem: Pressão ao Nível Médio do Mar, Temperatura do Ar a 2m, Umidade Relativa, sendo o Vetor Vento o campo de menor previsibilidade.

O autor ainda destaca que os resultados obtidos neste estudo são mais representativos do que resultados obtidos através de um simples estudo de caso, porém não são conclusivos do ponto de vista climatológico. Segundo Harter, é importante considerar a limitação da metodologia em se comparar a previsão do modelo, feita para um volume, com a observação pontual medida nas estações meteorológicas. Entretanto, o estudo realizado permite o conhecimento qualitativo e as tendências desta ferramenta no período e localidades estudadas.

Com relação à utilização do modelo hidrodinâmico Delft, Ribas (2004) implementou o modelo para as Baías de Antonina e Paranaguá-PR, com o objetivo de estudar o padrão hidrodinâmico da região. Após análise dos resultados, entre as conclusões geradas, a autora inferiu que o estuário de Paranaguá possui uma boa capacidade de mistura, resultando em uma homogeneidade vertical da temperatura e salinidade entre as camadas de superfície, meio e fundo. Porém, Ribas ainda ressalta a necessidade de simulações com maior disponibilidade de informações sobre níveis e correntes o que possibilitaria uma melhor avaliação dos resultados encontrados.

Outro trabalho que utilizou o modelo hidrodinâmico Delft no Estuário de Paranaguá foi realizado por Mayerle *et al.* (2015). Os autores implementaram um modelo tridimensional baseado no sistema de modelagem do Delft3D e com o auxílio de dados medidos em campo analisaram a influência do vento, das ondas e das marés no transporte de sedimentos no interior do CEP. Os resultados encontrados após a validação do programa mostraram que o modelo de transporte de sedimentos utilizado foi capaz de prever as concentrações de sedimentos de acordo com os dados observacionais. Como conclusão os autores consideraram os resultados obtidos úteis para quantificar a concentração e movimentação de sedimentos no interior do estuário.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

As etapas de desenvolvimento do trabalho consistem, primeiramente, na implementação do modelo The Weather Research & Forecasting Model (WRF) para a região de interesse. Após a implementação do modelo serão simulados cenários de entradas de frentes frias na região. Os arquivos de saída do WRF contendo os campos de ventos serão então utilizados como entrada para o modelo hidrodinâmico DELFT3D, com o intuito de analisar a resposta da hidrodinâmica local.

Após o processamento das informações, os dados de campos de vento e pressão simulados pelo WRF serão comparados com dados de estações meteorológicas com o objetivo de identificar se o modelo consegue reproduzir a passagem dos sistemas frontais com a mesma intensidade e no mesmo período dos dados observados. Para validação das informações geradas pelo modelo hidrodinâmico Delft3D, os resultados serão comparados com dados de elevação da superfície do mar e correntes, já existentes para o domínio de interesse.

4.1 CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO

4.1.1 O Complexo Estuarino de Paranaguá

O complexo Estuarino de Paranaguá (CEP) (48° 25' W, 25° 30' S) (Fig. 7) localiza-se na porção Centro-Norte da planície costeira do Estado do Paraná, tendo como limite Oeste a Serra do Mar e a Leste o Oceano Atlântico. O CEP possui uma área de cerca de 600 km² sendo composta por dois corpos d'água principais: as Baías de Antonina e de Paranaguá (260 km²); e as baías de Laranjeiras e Pinheiros (200 km²) (LANA *et al.*, 2001). O CEP apresenta duas conexões com o oceano Atlântico denominadas de Norte e Sul, de acordo com a sua posição geográfica em relação à ilha do Mel. A desembocadura Norte é composta por dois canais

denominados de canais Norte. A desembocadura Sul apresenta um canal chamado da Galheta. Os três canais serviram como via navegável ao interior do CEP, de forma que passaram por diversas dragagens. Atualmente a via de acesso navegável é o canal da Galheta (LAMOUR, 2007).

O CEP apresenta grande importância econômica, pois possui um rico ecossistema de manguezais, comporta muitas comunidades de pescadores que vivem em aldeias simples às margens do estuário e também abriga os portos de Antonina e Paranaguá, sendo o último um importante porto brasileiro e o primeiro na América Latina em exportação de grãos (CAMARGO, 1998; APPA, 2015). Além disso, através do estuário, é possível ter acesso a diversos pontos no continente, tais como a cidade de Paranaguá, Antonina e Guaraqueçaba, e as ilhas das Cobras, do Mel, das Peças e do Superagui (CAMARGO, 1998).

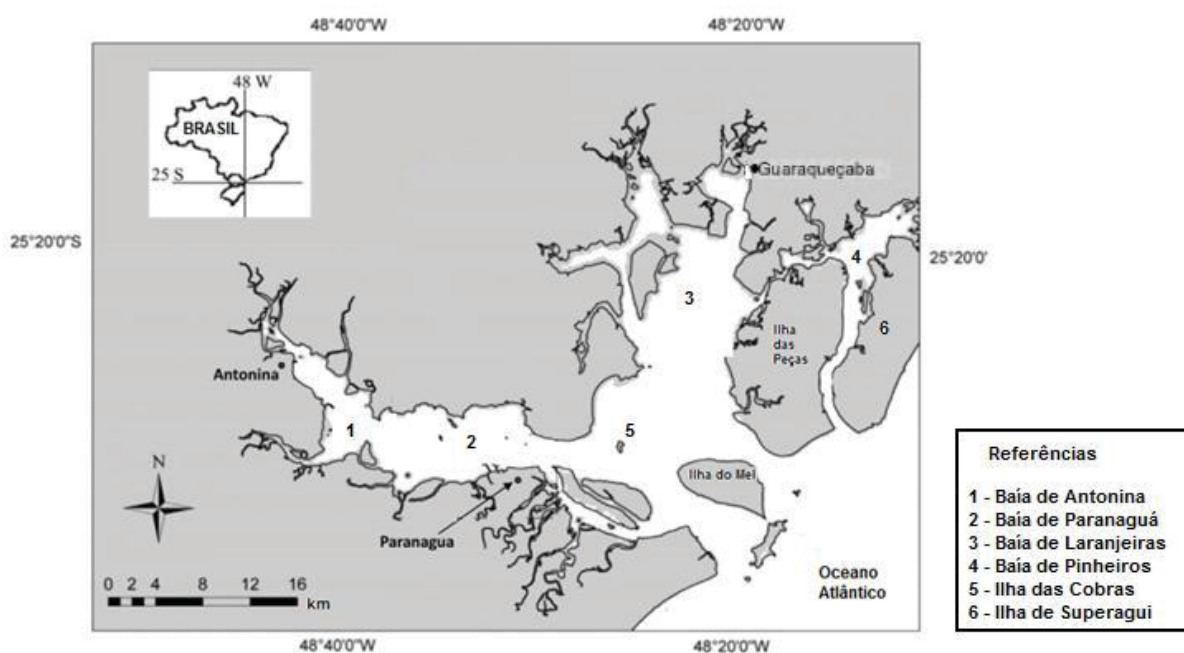


FIGURA 7. Complexo Estuarino de Paranaguá. Fonte: Adaptado de Mayerle et al., 2015.

Segundo Marone (1997) o estuário de Paranaguá pode ser classificado como parcialmente misturado, apresentando heterogeneidades nas laterais, sendo este padrão mais acentuado no verão do que no inverno (MANTOVANELLI, 1999). Verticalmente, a estrutura da coluna d'água é essencialmente homogênea, com

exceção de alguns períodos, principalmente no início da maré enchente, quando duas camadas de densidades diferentes aparecem bem marcadas (MARONE, 1997).

Padrões de estratificação salina são encontrados somente em situações de fortes marés vazantes, que ocorrem principalmente durante a ocorrência de chuvas intensas. Nos demais períodos observa-se uma variação espacial no padrão de estratificação, com águas bem misturadas no setor externo e uma progressiva estratificação em direção ao interior da baía (MARONE *et al.* 1995). Segundo Noernberg (2007), estas informações demonstram que a hidrodinâmica do CEP é fortemente influenciada por fatores climáticos, como o regime de chuvas e ventos.

O intercâmbio de propriedades entre o sistema interno e o mar aberto é governado principalmente pelo regime de marés, sendo substancialmente diferente nas marés de sizígia e quadratura (NOERNBERG, 2007; MAYERLE, 2015). Entretanto, foi observado que o setor Leste-Oeste do CEP sofre maior influência do aporte de água doce em relação ao eixo Norte-Sul, apresentando respostas mais rápidas e intensas aos processos relacionados a estratificação da coluna d'água, intrusão salina, aporte de sedimentos fluviais e formação da zona de máxima turbidez (NOERNBERG, 2001).

Com relação às características hidrodinâmicas, o CEP apresenta profundidade média de cerca de 5 metros, porém o canal de navegação pode atingir profundidades de até 20m (MAYERLE, 2015). Segundo Mayerle (2015) estudos numéricos demonstram que as profundidades e as correntes no interior do Complexo Estuarino de Paranaguá são determinadas basicamente pelo regime de marés.

O ciclo completo de maré para a região é de 12,4h, tendo um range médio de maré de $\pm 2,0$ m. As maiores velocidades de correntes atingem de 0,8 a 0,85 m/s na enchente e de 1,0 a 1,4 m/s na vazante (NOERNBERG, 2007). Variações do nível do mar de até 80 cm acima dos valores de maré astronômica têm sido observadas na região, devido aos efeitos de marés meteorológicas causadas pelas passagens de frentes frias (MARONE & CAMARGO, 1994).

Com relação ao regime de ventos da região, este é controlado pela influência da Alta do Atlântico Sul e pela passagem de sistemas frontais, sendo que a cadeia de montanhas da Serra do Mar age como barreira contra estas frentes, resultando na concentração de frentes estacionárias na região das baías (LANA *et al.*, 2001). Os ventos predominantes na região são os dos setores Leste e Nordeste, apresentando intensidade média de 4 m/s (MARONE *et. al.*, 1995).

4.1.2 Identificação dos Sistemas Frontais e Forçantes do Modelo Atmosférico

Os períodos em que ocorreram a passagem dos sistemas frontais na área de interesse foram identificados a partir de dados de cartas sinóticas e dados meteorológicos (velocidade do vento e pressão do ar). As cartas sinóticas (Fig. 8) foram obtidas através do site da Marinha do Brasil que disponibiliza cartas atualizadas a cada 12 horas. Os dados meteorológicos foram obtidos de estações do Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR) localizada em Paranaguá e da estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) localizada na Ilha do Mel. Os dados da estação localizada na Ilha do Mel estão disponíveis em frequência horária, enquanto que os dados da estação de Paranaguá são coletados a cada quinze minutos.

Após a identificação dos períodos em que ocorreu a passagem de frentes frias no CEP o modelo WRF foi então inicializado com as condições iniciais (dados meteorológicos) obtidas do modelo global Global Forecast System (GFS) (descrito em maiores detalhes na seção 4.3) correspondentes ao período em questão.

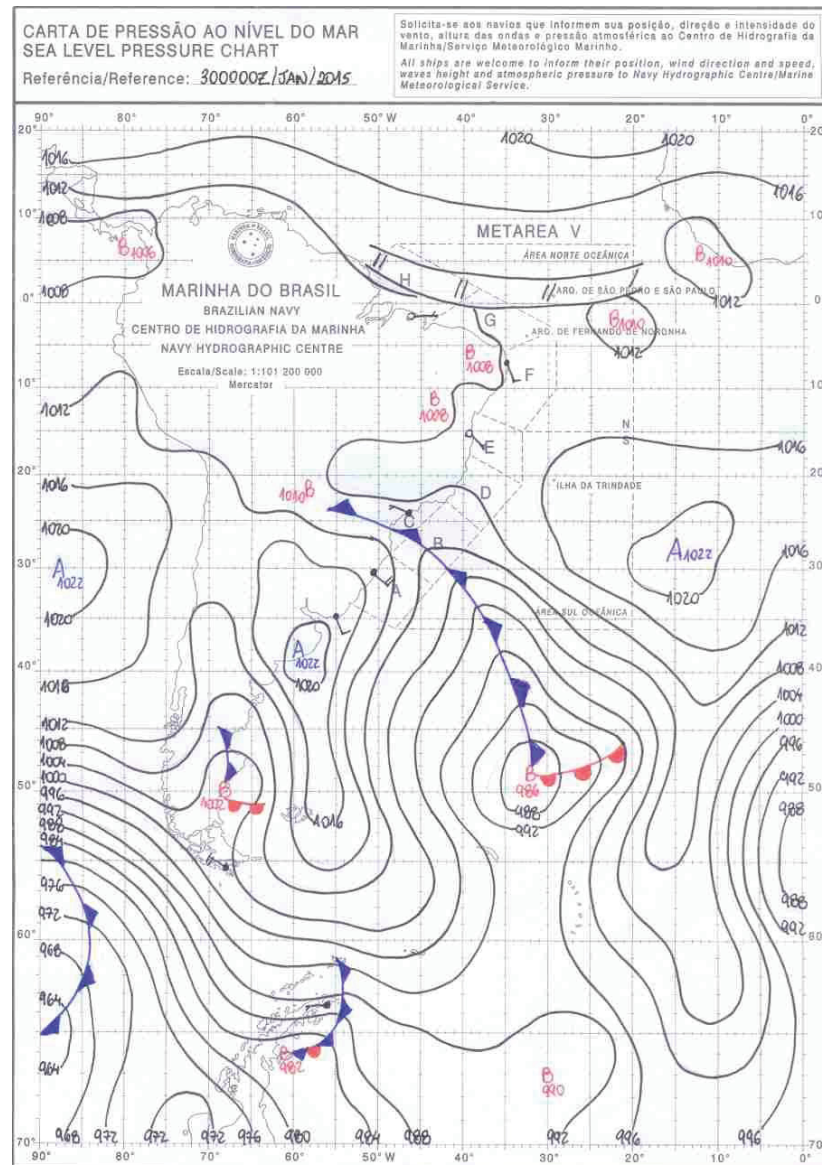


FIGURA 8. Carta sinótica referente ao dia 30/01/2015 às 00h00min. Linhas em azul e vermelho indicam sistemas frontais frios e quente, respectivamente. Fonte: Marinha do Brasil, 2015.

4.1.3 Forçantes do Modelo Hidrodinâmico

Para analisar as principais forçantes da hidrodinâmica do Complexo Estuarino de Paranaguá, foram escolhidos como forçantes do modelo hidrodinâmico Delft3D dados de maré disponíveis e dados de velocidade e direção do vento obtidos do modelo atmosférico WRF.

4.1.3.1 Maré

As principais componentes harmônicas da maré (Tabela 3) para o Complexo Estuarino de Paranaguá foram modeladas por Harari e Camargo (1994). Os autores simularam as componentes de maré na plataforma sul e sudeste brasileira, através do processamento de um modelo numérico hidrodinâmico. A área modelada se estende da Ponta do Vigia – SC a Cabo Frio – RJ, da costa até a isóbata de aproximadamente 100m. Cada componente principal de maré foi processada isoladamente, com o objetivo de determinar suas características (linhas cotidais e elipses de corrente na superfície) em cada área de interesse. A partir dos resultados gerados por Harari e Camargo (1994) é possível prever as elevações e as correntes de maré, em qualquer local da área modelada e para qualquer período de interesse.

TABELA 3. Principais constantes harmônicas para o Complexo Estuarino de Paranaguá.

COMPONENTE	AMPLITUDE (m)	FASE (Graus)
S2	0,2827	176,177
M2	0,3640	171,748
N2	0,0578	241,422
K1	0,0836	187,618
P1	0,0276	182,697
O1	0,1095	121,994
Q1	0,0232	96,3939
NU2	0,0110	232,087
MU2	0,0499	278,646
L2	0,0209	182,422
T2	0,0166	176,000
K2	0,0768	176,535
2N2	0,0076	311,097

4.1.3.2 Vento

Os dados de velocidade do vento (componente zonal: U e componente meridional: V) a 10 m de altura do solo utilizados como forçante do modelo hidrodinâmico Delft3D são os dados gerados pelo modelo atmosférico WRF.

Com o intuito de isolar os efeitos do vento na hidrodinâmica do CEP valores de salinidade, temperatura e vazão dos rios que desaguam no CEP não são considerados durante as simulações. Para validação dos resultados gerados pelo Delft3D foram utilizados dados de elevação da superfície do mar obtidos pelo Centro de Estudos do Mar da Universidade Federal do Paraná.

4.2 MODELOS

4.2.1 O Weather Research & Forecasting Model – WRF

O Weather Research & Forecasting Model (WRF) é um modelo numérico de previsão do tempo e um sistema de simulação atmosférica criado para fins de aplicação tanto em pesquisas como também operacionalmente. O WRF foi elaborado para ser uma ferramenta de domínio público e de distribuição gratuita, flexível e eficiente em variadas plataformas computacionais, desde supercomputadores a notebooks. O WRF pode ser aplicado tanto a situações idealizadas como à atmosfera real, em escalas horizontais que podem ir desde algumas centenas de metros até milhares de quilômetros. As aplicações do modelo incluem:

- Previsão numérica em tempo real;
- Desenvolvimento de técnicas de assimilação de dados e pesquisa;
- Investigação da validade de parametrizações físicas;
- Simulação de climas regionais;
- Modelagem da qualidade do ar;
- Acoplamento entre modelos atmosféricos e oceânicos.

4.2.1.1 Sistemas de Modelagem do WRF

O sistema de modelação do WRF, o ARW (Advanced Research WRF), possui um sistema de equações baseado nas soluções Eulerianas para equações compressíveis, não hidrostáticas e hidrostáticas. É conservativo para variáveis escalares e os níveis verticais de pressão hidrostática (Fig. 9) são fornecidos ao modelo em coordenadas sigma (Equação 4.1) que, junto ao solo, acompanham o contorno do terreno (CARVALHO, 2009).

$$\eta = \frac{P_h - P_{top}}{P_s - P_{top}} \quad (4.1)$$

Onde, P_h é a pressão em cada nível, P_{top} é a pressão no topo da atmosfera (constante) e P_s é a pressão à superfície. η varia de 0 a 1, sendo 0 no topo da atmosfera e 1 na superfície. Com o auxílio da equação 4.1 obtém-se o valor de pressão no nível vertical, que pode ser transformado em uma estimativa da altura em relação à superfície do nível de pressão de referência.

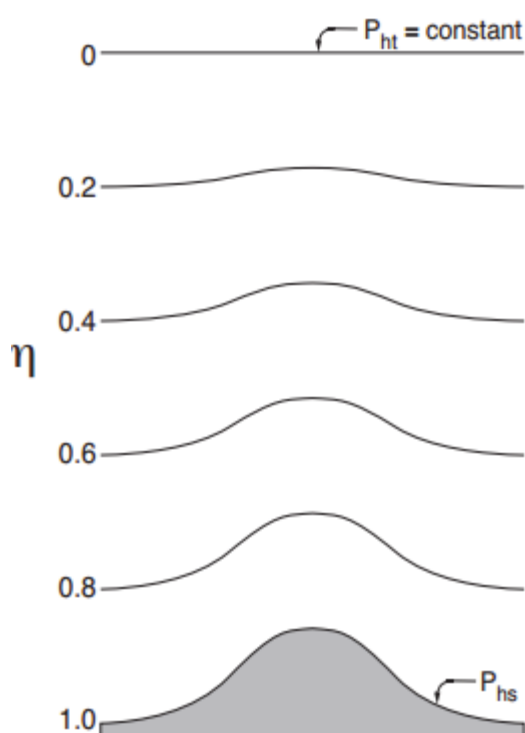


FIGURA 9. Níveis verticais (coordenada sigma pressão) utilizados pelo ARW. Fonte: Skamarock *et al.*, 2008.

As variáveis de prognóstico utilizadas pelo modelo são a massa da coluna de ar seco, velocidades (u , v e w), temperatura potencial e altura geopotencial. As variáveis não conservativas (temperatura, pressão e densidade) são diagnosticadas a partir das variáveis prognósticas (conservativas). A malha horizontal do modelo é do tipo Arakawa-C (Fig. 10) e o esquema de integração temporal do modelo utiliza o esquema de Runge-Kutta de terceira ordem, acoplado com um esquema de integração semi-implícito de 2ª ordem no tempo para as ondas de gravidade e acústicas. A discretização horizontal recorre a esquemas de segunda a sexta ordem (SKAMAROCK *et al.*, 2008).

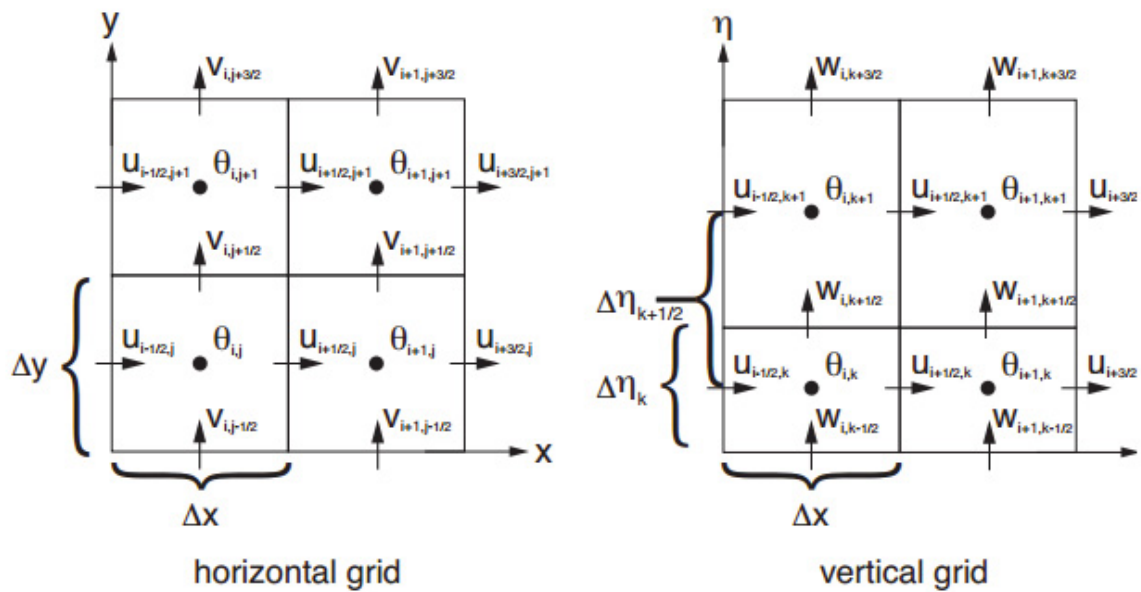


FIGURA 10. Grid horizontal e vertical no formato (Arakawa-C) utilizado pelo ARW. Fonte: Skamarock, 2008.

4.2.1.2 Aninhamento de grades

Em casos onde é necessário analisar mais detalhadamente uma região de interesse é aconselhável fazer um aninhamento de grades, com o objetivo de obter dados da área com uma alta resolução espacial sem que toda grade tenha que ser rodada com um Δx menor. A Figura 11 mostra exemplos de aninhamentos de grade possíveis de serem feitos no WRF.

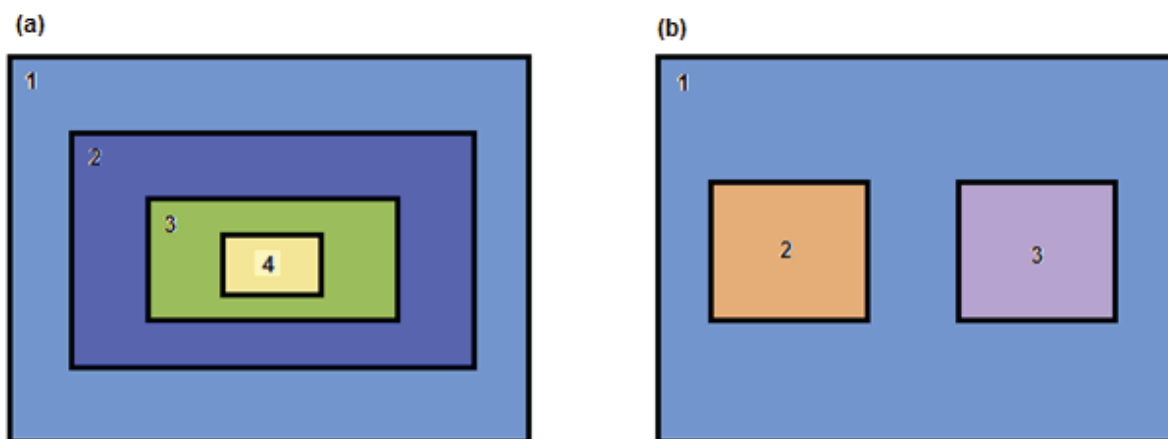


FIGURA 11. Exemplos de aninhamentos de grade permitidos no WRF.

Em ambos os casos apresentados as condições de contorno (CC) da grade menor (FG, *fine grid*) são interpolados a partir da previsão fornecida pela grade maior (CG, *coarse grid*), ou seja, no exemplo 11(a) a interpolação se dá de $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$ e no exemplo 11(b) a interpolação ocorre de $1 \rightarrow 2$ e de $1 \rightarrow 3$. Os dados calculados nas grades podem fluir em apenas um sentido (*1-way*) ou em ambos (*2-way*). No modo unidirecional (*1-way*) os valores da CG são simplesmente utilizados como condições de contorno na FG. Já no modo bidirecional, ocorre o mesmo processo, entretanto, os pontos de contorno da CG que estão dentro da FG tem seus valores alterados para aqueles obtidos pela FG.

Exemplos da disposição das variáveis em grades aninhadas são apresentadas na Figura 12. A alternância dessas variáveis na grade define como a FG é colocada sobre a CG e influencia os resultados quando o modo bidirecional (*2-way*) está ativo. Se a razão entre o Δx_{CG} e Δx_{FG} for ímpar (Fig. 12(a)), os pontos que contem determinada variável na CG e FG coincidem. Caso contrário, o ponto da CG fica equidistante dos quatro pontos da FG e simplesmente recebe o valor do canto inferior esquerdo (CONSELVAN, 2006).

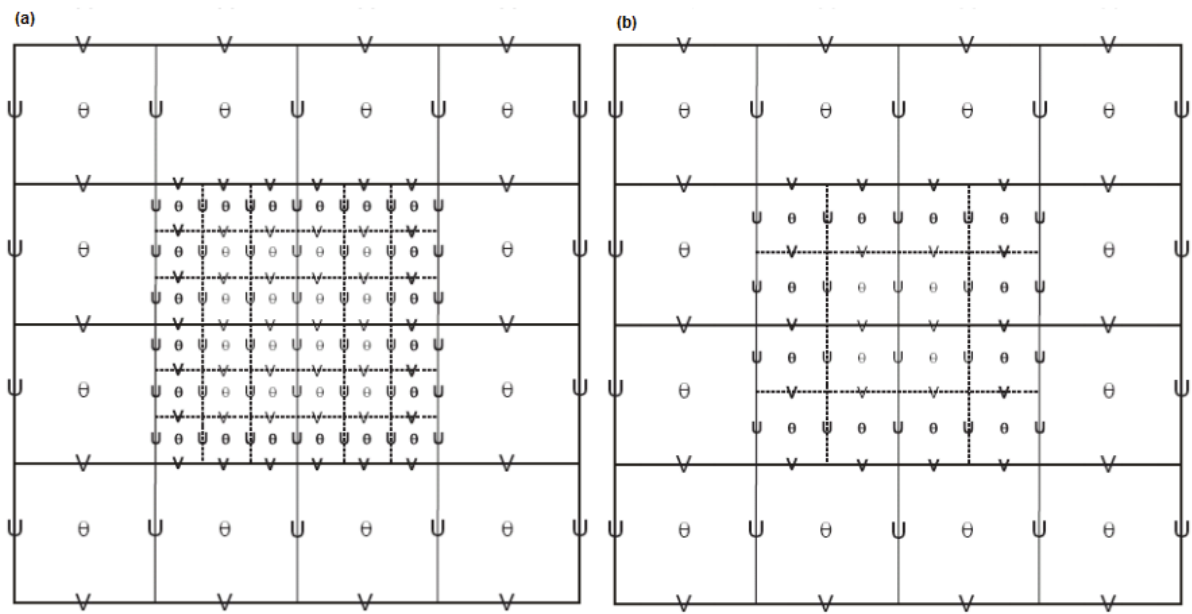


FIGURA 12. Exemplos de grades aninhadas do tipo C. Fonte: Adaptado de Conselvan, 2006.

4.2.1.3 Equações Governantes

Todos os cálculos executados pelo WRF a fim de simular as condições da atmosfera são baseados em um conjunto de equações que representam o comportamento da atmosfera. O sistema de equações diferenciais parciais por elas composto não pode ser resolvido analiticamente, a menos que várias aproximações sejam feitas. Entretanto, com essas aproximações a capacidade de representar fenômenos reais é praticamente nula. As equações são definidas na forma diferencial como (SKAMAROCK *et al.*, 2008):

$$\partial_t U + (\nabla \cdot \mathbf{V}_u) - \partial_x(p\phi_\eta) + \partial_x(p\phi_x) = F_U \quad (4.2)$$

$$\partial_t V + (\nabla \cdot \mathbf{V}_v) - \partial_y(p\phi_\eta) + \partial_y(p\phi_y) = F_V \quad (4.3)$$

$$\partial_t W + (\nabla \cdot \mathbf{V}_w) - g(\partial_\eta p - \mu) = F_w \quad (4.4)$$

$$\partial_t \Theta + (\nabla \cdot \mathbf{V}_\theta) = F_\Theta \quad (4.5)$$

$$\partial_t \mu + (\nabla \cdot \mathbf{V}) = 0 \quad (4.6)$$

$$\partial_t \phi + \mu^{-1} [(\nabla \cdot \mathbf{V}_\phi) - gW] = 0 \quad (4.7)$$

$$\partial_\eta \phi = -\alpha \mu \quad (4.8)$$

$$p = p_0 (R_d \theta / p_0 \alpha)^\gamma \quad (4.9)$$

Onde:

$\mathbf{v} = (u, v, w) \rightarrow$ Velocidade;

$\theta \rightarrow$ temperatura potencial;

$\phi = gz \rightarrow$ geopotencial;

$p \rightarrow$ pressão;

$\alpha = \frac{1}{\rho} \rightarrow$ inverso da densidade;

$\gamma = \frac{c_p}{c_v}$;

$R_d \rightarrow$ constante do gás para ar seco;

$p_0 \rightarrow$ pressão de referência;

$\mathbf{V} = \mu \mathbf{v} = (U, V, W)$;

$\Theta = \mu \theta$;

F_U, F_V, F_W e $F_\Theta \rightarrow$ Termos forçantes devido a física do modelo, mistura turbulenta, projeções esféricas e a rotação da Terra.

As equações 4.2 à 4.4 representam a conservação de quantidade de movimento, 4.5 representa a conservação de energia termodinâmica, 4.6 a conservação da massa, 4.7 a equação geopotencial e 4.9 representa a equação de estado termodinâmico.

4.2.2 Delft3D

O modelo hidrodinâmico Delft3D, desenvolvido pela WL-Delft Hydraulics, instituto de pesquisa holandês, é composto por um conjunto de programas (módulos), com capacidade de simulação de escoamentos de massas de águas superficiais. Possui uma estrutura flexível que simula fluxos em duas ou três dimensões, assim como ondas, qualidade da água, ecologia, transporte de sedimento e morfologia do fundo, com a capacidade de interação entre estes processos.

Os módulos que compõem o Delft3D são: FLOW (Hidrodinâmico); WAVE (Ondas); SED (transporte de sedimentos); MOR (Morfodinâmica); WAQ (Qualidade de água); PART (Traçadores); ECO (Ecologia) e CHEM (Química), estes módulos possuem ferramentas de pré-processamento, processamento e pós-processamento, o que facilita o trabalho de implementação de modelos para uma região específica (HYDRAULICS, 2014).

4.2.2.1 Delft3D-FLOW

O Delft3D-FLOW foi desenvolvido para uma série de aplicações, podendo ser utilizado para: estudos de correntes geradas por marés (forçante barotrópica) e/ou ventos; gradientes horizontais de densidade gerados pelo balanço entre as águas doces dos rios e salgadas do oceano; transporte de materiais dissolvidos e poluentes, além de circulações em regiões costeiras, permitindo a simulação com barreiras físicas, como ilhas e obras costeiras.

4.2.2.1.1 Equações Hidrodinâmicas do Delft3D-FLOW

O Delft3D-FLOW simula processos hidrodinâmicos resolvendo as equações de Navier-Stokes e da conservação da massa para fluidos incompressíveis além da equação do transporte de massa para cada constituinte de qualidade da água ou de processos nos sedimentos.

O módulo hidrodinâmico (FLOW), é capaz de realizar simulações em duas (2D) ou três (3D) dimensões de fluxos instáveis, sendo usado para prever fluxos em áreas costeiras, estuários, rios, lagoas e lagos. Se o fluido é verticalmente homogêneo, é utilizado um modelo 2D, onde é considerada apenas uma camada do fluido. Já nas situações em que os campos de fluxos mostram variações significativas na vertical é utilizado um modelo 3D (HYDRAULICS, 2014). O Delft3D aplica a chamada transformação da coordenada σ ou profundidade adimensional, de modo a tornar a dimensão vertical independente da profundidade, e desta forma evitar que os elementos de grades interceptem a topografia do fundo (MIRANDA *et al.* 2002;). A coordenada σ é definida como:

$$\sigma = \frac{z-\zeta}{d+\zeta} = \frac{z-\zeta}{H} \quad (4.10)$$

Onde:

$z \rightarrow$ Coordenada vertical no espaço físico (m);

$\zeta \rightarrow$ Elevação da superfície livre acima do plano de referência (m);

$d \rightarrow$ Profundidade da coluna d'água abaixo do plano de referência (m);

$H \rightarrow$ Profundidade total da coluna d'água (m).

Sendo considerado no fundo $\sigma = -1; z = -h$ e na superfície livre $\sigma = z = 0$ (Fig. 13).

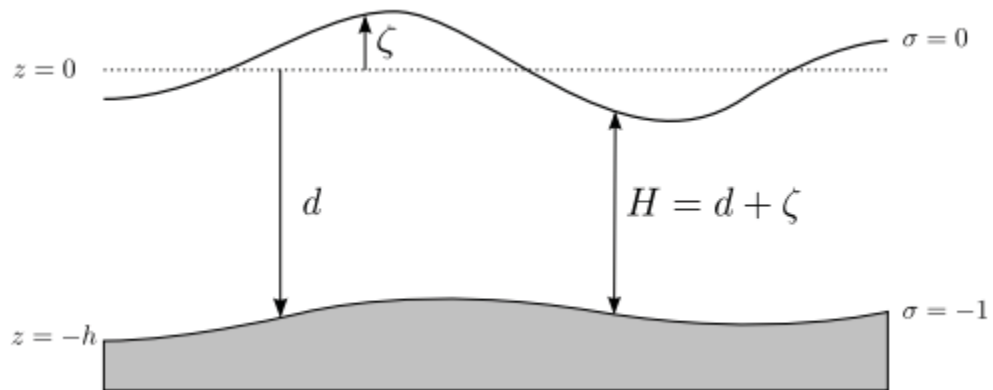


FIGURA 13. Definição do nível da água (ζ), profundidade (h) e profundidade total (H). Fonte: Hydraulics, 2014.

No sistema de coordenadas σ o número de camadas no plano horizontal é o mesmo em todos os locais (Fig. 14) e para cada camada um conjunto de equações de conservação é resolvido.

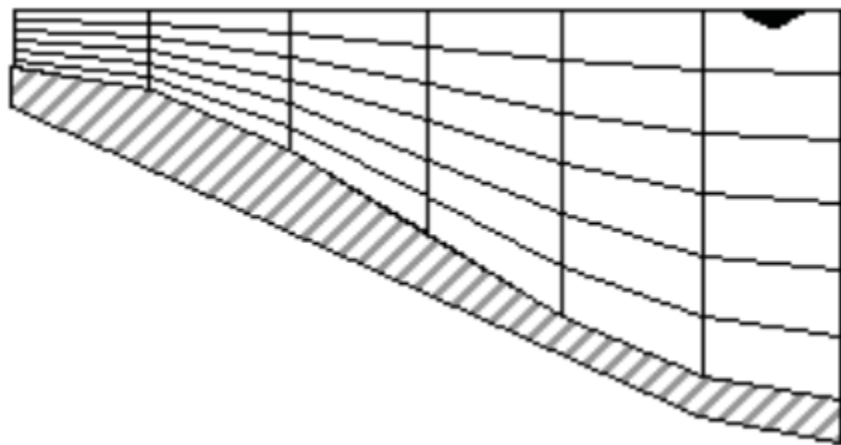


FIGURA 14. Exemplo de uma grade em coordenadas σ . Fonte: Hydraulics, 2014.

As equações governantes para um fluido incompressível de superfície livre são relacionadas com as leis de conservação da física: Conservação da massa (Eq. 4.11) e conservação de momentum (Eq. 4.12, 4.13 e 4.14). Como já citado, as equações são derivadas do sistema de equações de Navier-Stokes para um fluido incompressível de superfície livre. As equações do movimento e da continuidade,

integradas na vertical, são resolvidas levando em conta as aproximações para águas rasas de Boussinesq. E os campos de velocidade e de elevação da superfície são obtidos pela solução da equação de Navier-Stokes (Eq. 4.12, 4.13, 4.14) e da continuidade (Eq. 4.11) (HYDRAULICS, 2014; BERNARDO, 2013; LOPES, 2010).

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4.11)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - fv = g \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu_H \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\nu_V \frac{\partial u}{\partial z} \right] \quad (4.12)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + fu = g \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu_H \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\nu_V \frac{\partial v}{\partial z} \right] \quad (4.13)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \rho(x, y, z)g \quad (4.14)$$

Onde:

$x, y, z \rightarrow$ Coordenadas espaciais.

$u, v, w \rightarrow$ Componentes de velocidade nas direções x, y e z ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$);

$t \rightarrow$ Tempo (s);

$f \rightarrow$ Parâmetro de Coriolis $f = 2\Omega \text{seno}\theta$, onde Ω é a taxa de rotação e θ a latitude;

$g \rightarrow$ Aceleração da gravidade (m/s^2);

$H \rightarrow$ Altura da coluna d'água (m);

$\rho \rightarrow$ Densidade do fluido ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$);

$P \rightarrow$ Pressão hidrostática ($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$);

ν_H e $\nu_V \rightarrow$ Viscosidade turbulenta na horizontal e na vertical, respectivamente.

Sendo o principal objetivo deste trabalho analisar o efeito do vento na circulação estuarina do CEP, torna-se importante definir como o modelo hidrodinâmico Delft3D realiza os cálculos da tensão de cisalhamento e do coeficiente de arrasto do vento.

No Delft3D a magnitude da tensão de cisalhamento do vento é definida como (HYDRAULICS, 2014):

$$|\vec{\tau}_s| = \rho_a C_d U_{10}^2 \quad (4.15)$$

Onde,

ρ_a – densidade do ar.

U_{10} – velocidade do vento a 10 metros da superfície.

C_d – Coeficiente de arrasto do vento (dependente de U_{10})

O coeficiente de arrasto do vento pode ser linearmente dependente da velocidade do vento, refletindo no aumento da rugosidade da superfície da água com o aumento da velocidade do vento. No Delft3D podem ser definidos três valores para o coeficientes de arrasto e três velocidades do vento. Os três coeficientes de arrasto do vento determinam três pontos de interrupção. Os dois primeiros coeficientes, ponto de interrupção (A), determina o coeficiente de arrasto do vento de vento zero até a velocidade do vento especificada. Os dois últimos coeficientes, interrupção (C), especifica o coeficiente de arrasto do vento da velocidade vento especificada até uma velocidade superior. Entre os pontos de interrupção há uma interpolação linear aplicada. Como resultado, o usuário pode especificar um coeficiente de arrasto do vento constante, um coeficiente de arrasto do vento de forma linear crescente ou um coeficiente linear, conforme mostrado na Figura 15 (HYDRAULICS, 2014).

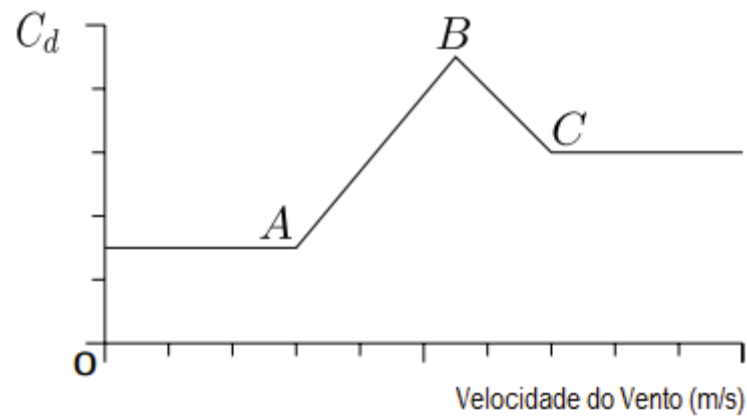


FIGURA 15. Exemplos de Coeficientes de Arrasto do Vento aplicados no modelo hidrodinâmico Delft3D.

Como o coeficiente de arrasto do vento pode ser dependente da velocidade do vento, refletindo o aumento da rugosidade da superfície do mar com o aumento da velocidade do vento. O modelo Delft3D permite especificar uma relação empírica do coeficiente de arrasto do vento como a seguinte:

$$C_d(U_{10}) = \begin{cases} C_d^A, & U_{10} \leq U_{10}^A, \\ C_d^A + (C_d^B - C_d^A) \frac{U_{10} - U_{10}^A}{U_{10}^B - U_{10}^A}, & U_{10}^A \leq U_{10} \leq U_{10}^B, \\ C_d^B + (C_d^C - C_d^B) \frac{U_{10} - U_{10}^B}{U_{10}^C - U_{10}^B}, & U_{10}^B \leq U_{10} \leq U_{10}^C, \\ C_d^C, & U_{10}^C \leq U_{10}, \end{cases} \quad (4.16)$$

Onde,

C_d^i – coeficientes de arrasto do vento definidos pelo usuário, para as velocidades do vento U_{10}^i ($i = A, B, C$).

U_{10}^i – velocidades do vento definidas pelo usuário ($i = A, B, C$).

4.3 IMPLEMENTAÇÃO DOS MODELOS

4.3.1 Implementação do Weather Research & Forecasting Model – WRF

4.3.1.1 A estrutura do WRF

A estrutura do WRF (Fig. 16) consiste de um pré-processamento das condições iniciais, obtidas do modelo global GFS (Global Forecast System) (dados meteorológicos) e de dados da geografia da área de estudo, realizado em um módulo do WRF denominado de WPS (WRF Preprocessing System). A saída do WPS é passada para o processamento principal realizado pelo ARW Model. Por fim, os arquivos de saída do WPS e WRF estão no formato Network Common Data Form (NetCDF), e podem ser visualizados utilizando algumas ferramentas gráficas, tais como GMT, NCL ou GrADS.

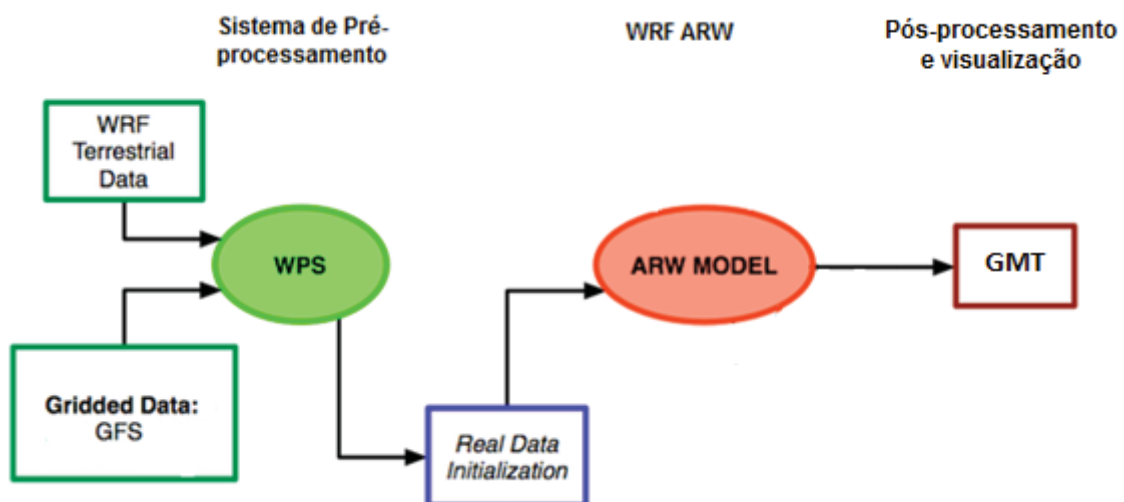


FIGURA 16. Etapas de processamento do modelo atmosférico WRF. Fonte: Skamarock, 2008.

4.3.1.2 Pré-Processamento WRF

A primeira etapa do WRF é realizada pelo pacote de programas denominado WPS. A função do Sistema de Pré-processamento (WPS) é de definir a localização e resolução do domínio usado na simulação, interpolar e gerar mapas de dados estáticos, como a topografia e tipos de solo, e ainda interpolar as condições de fronteira (oriundas dos modelos globais, neste caso o GFS) para todos os pontos da malha, conforme a resolução escolhida (CARVALHO, 2009). A malha utilizada foi desenvolvida com o auxílio do programa WRF Portal.

4.3.1.2.1 WRF Portal

O WRF Portal é uma interface gráfica desenvolvida pela Earth System Research Laboratory da National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA). O WRF Portal pode ser utilizado para a configuração e execução de ambos os núcleos do WRF: ARW e NMM, bem como para configurar e executar seus programas (WPS e ARW model). Com o auxílio desta interface gráfica é possível simplificar a seleção/localização do domínio escolhido, o funcionamento e o monitoramento do WRF e a visualização das saídas do modelo (WRF PORTAL, 2015).

Com o auxílio do WRF Portal foram definidas as características da grade (tipo de projeção, localização, números de pontos, números de aninhamentos, e espaçamentos) para que após esta etapa sejam interpolados os campos estáticos (tipos de solo, topografia, uso e cobertura do solo, etc.) que descreverão o domínio. As principais características da grade utilizada neste trabalho (Fig. 17) estão listadas na tabela 4.

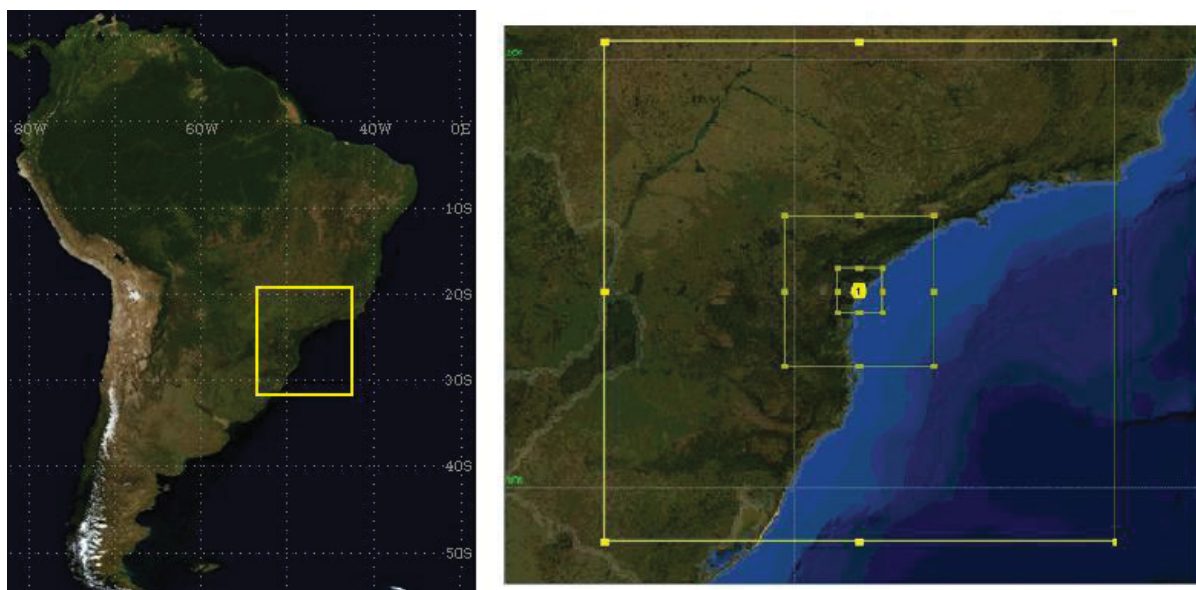


FIGURA 17. Domínio utilizado nas simulações com o modelo WRF.

TABELA 4. Características do domínio utilizado nas simulações com o modelo WRF (Continua).

Característica	Domínio Principal	1º Aninhamento	2º Aninhamento
Projeção	Lambert	Lambert	Lambert
Latitude do Ponto Central	-25,492	-25,432	-25,432
Longitude do Ponto Central	-48,433	-48,413	-48,413
Pontos em X	100	146	226
Pontos em Y	104	156	236
Espaçamento dos pontos (km)	12,5	2,5	0,5
Níveis na Vertical	30	30	30
Passo de Tempo (s)	75		
Número de Domínios	3		
Topo	5000		
Opção de Microfísica	WSM3	WSM3	WSM3
Radiação – Onda Longa	RRTM	RRTM	RRTM

Característica	Domínio Principal	1º Aninhamento	2º Aninhamento
Radiação – Onda Curta	Dudhia	Dudhia	Dudhia
Camada de Superfície	Thermal Diffusion	Thermal Diffusion	Thermal Diffusion
Camada Limite de Solo	YSU	YSU	YSU
Camada Limite Planetária	YSU	YSU	YSU
Opção de Cumulus	Kain-Fritsch	Kain-Fritsch	Kain-Fritsch

As parametrizações para microfísica, nuvens cumulus, radiação de onda longa e curta, camada superficial, camada de superfície de solo e camada limite atmosférica foram baseadas nas parametrizações utilizadas por Carvalho (2015), que realizou simulações numéricas de alta resolução, com diferentes configurações de regionalização dinâmica, para analisar a sensibilidade do modelo atmosférico WRF na reprodução da velocidade do vento em duas estações meteorológicas no Estado do Paraná, sendo uma delas no litoral do estado, na cidade de Guaratuba, e em Paranaíba no interior.

As parametrizações utilizadas por Carvalho (2015) foram as seguintes: WSM6 para a microfísica, RRTM para radiação de onda longa, Dudhia para radiação de onda curta, PX para camada limite superficial, Pleim-Xiu para camada de superfície de solo, ACM2 para camada limite planetária e Kain-Fritsch para a opção de nuvens cumulus. Neste trabalho as opções para as camadas limites superiores, de superfície de solo e planetária foram mantidas as opções pré-existentes no modelo e para a opção de microfísica foi escolhida a WSM3, pois esta é indicada para análises de fenômenos de mesoescala.

4.3.1.2.2 GFS

Os dados gerados pelo modelo atmosférico GFS são disponibilizados na internet pelo National Centers for Environmental Prediction (NCEP). São geradas quatro simulações diárias em um intervalo de 6 horas (0h, 6h, 12h e 18h UTC), com resoluções espaciais de 0,25; 0,5; 1,0 e 2,5 graus de latitude e longitude e resolução temporal de 3 horas, com horizonte de até 384 horas. Neste estudo são utilizados dados com resolução espacial de 0,25° e resolução temporal de 6 horas.

Para finalizar, os dados meteorológicos são interpolados horizontalmente, no sistema de coordenadas da grade, e verticalmente no sistema de coordenadas sigma. Como resultados são gerados arquivos binários no formato NetCDF com as condições iniciais e de contorno que serão utilizadas pelo ARW model.

4.3.1.2.3 Pós-processamento

Após a simulação, os arquivos de saídas gerados pelo WRF, neste estudo, são então analisados com o auxílio da ferramenta de visualização gráfica GMT (Generic Mapping Tools).

4.3.2 Implementação do Delft3D

Para a implementação do modelo hidrodinâmico Delft3D na região de estudo alguns procedimentos de pré-processamento são fundamentais. Os principais procedimentos, geração da grade numérica e a interpolação dos dados batimétricos, são apresentados a seguir.

4.3.2.1 Grade Numérica

O primeiro passo para a construção da grade numérica é a definição dos limites externos do domínio de interesse. Com base no contorno da área de estudo (linha de costa) obtido diretamente de imagens de satélite (Fig. 18), em coordenadas UTM, são criadas linhas de tendência denominadas *splines*, as quais foram utilizadas pelo Delft3D na construção da grade numérica. A posição e orientação da grade devem representar bem os canais principais de maré, o contorno de ilhas e a costa (TOBÓN, 2002). Desta forma, visando a construção de uma boa grade numérica, os *splines* foram criados seguindo as linhas de fluxo do domínio modelado. Após a definição dos *splines* a grade numérica foi gerada automaticamente pelo programa. Devido às características morfológicas da área de estudo optou-se pela utilização de uma grade numérica (Fig. 19) curvilínea no plano horizontal visando um aumento da precisão e eficiência computacional durante as simulações.

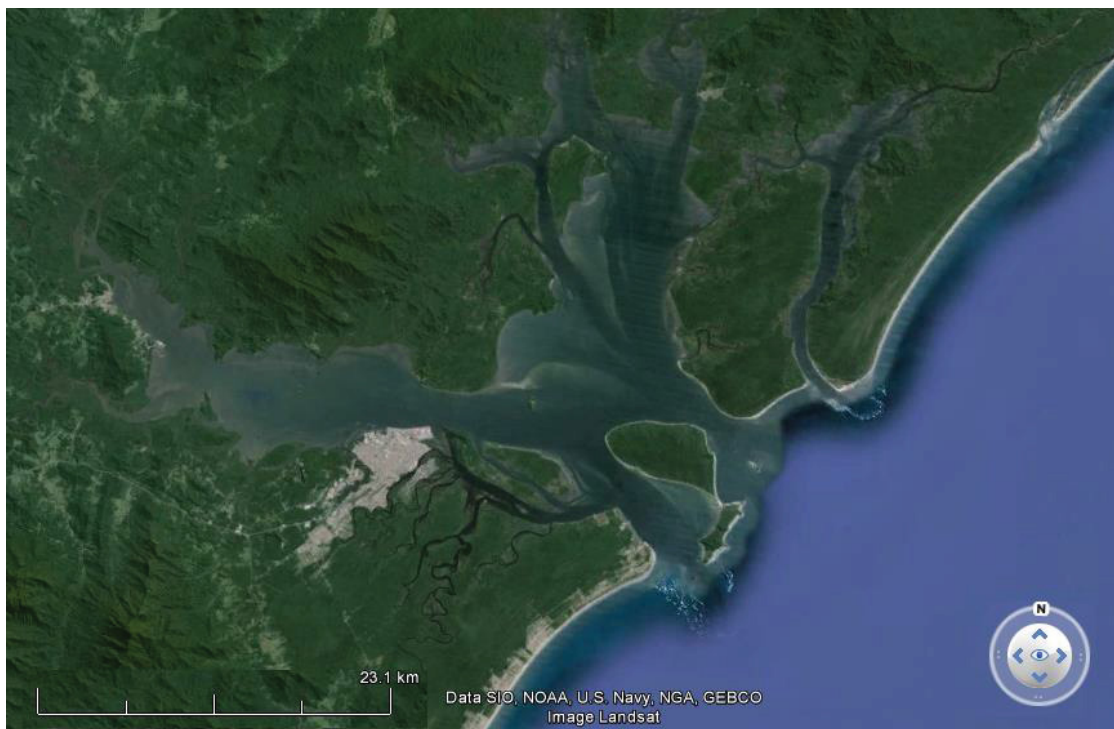


FIGURA 18. Imagem de satélite do Complexo Estuarino de Paranaguá. Fonte: Google Earth

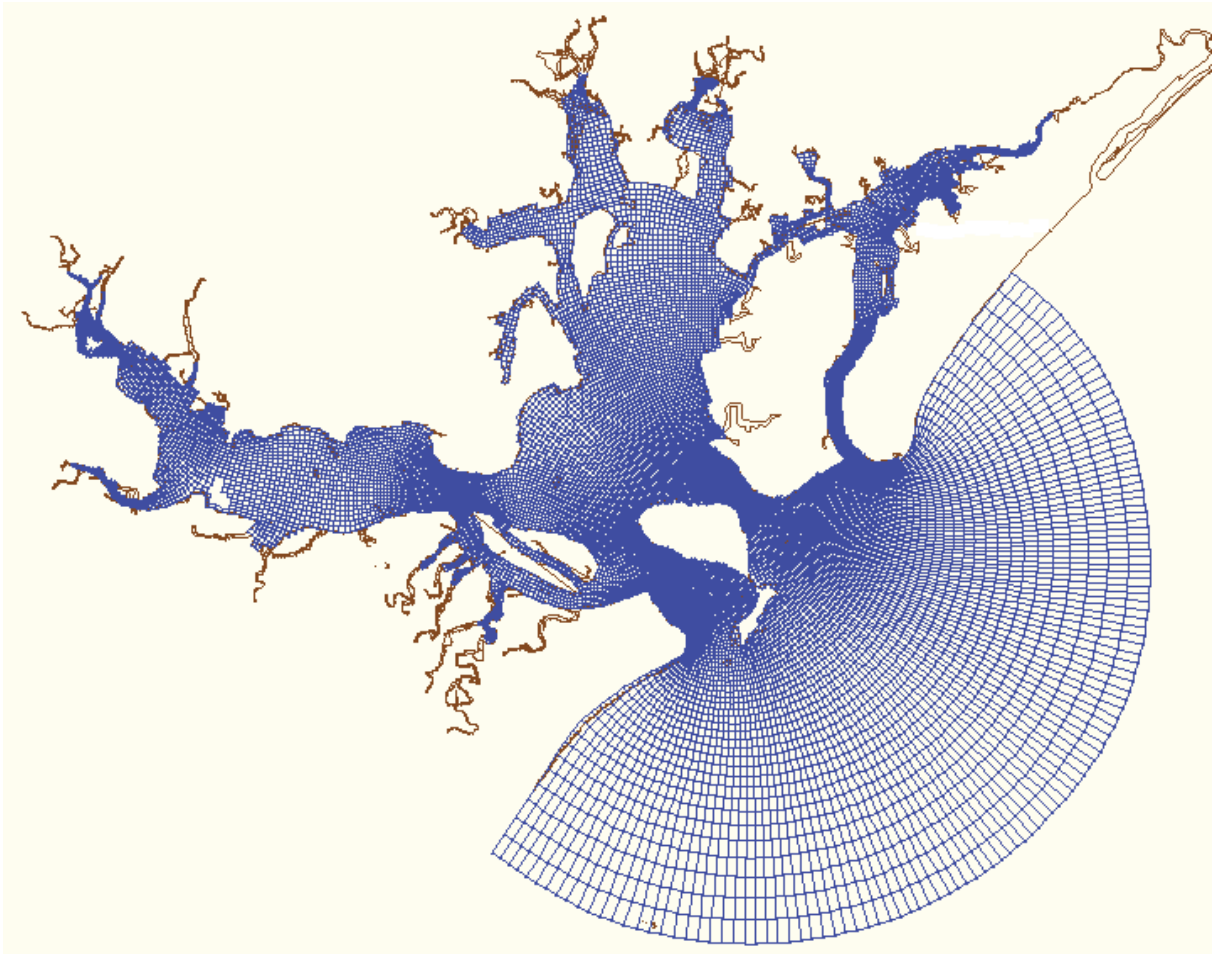


FIGURA 19. Grade e linha de costa gerada para a área do Complexo Estuarino de Paranaguá.

4.3.2.2 Propriedades da Grade Numérica

Ortogonalidade

A medida de ortogonalidade utilizada pelo Delft3D é o ângulo, ou o cosseno do ângulo, entre as linhas de grade nas direções M e N. O erro na direção do gradiente de pressão é proporcional ao valor do cosseno desviado de zero. Valores de ortogonalidade inferiores a 0,04 são recomendados, sendo o erro no termo da

advecção proporcional ao valor da ortogonalidade. Na Figura 20 é apresentada a ortogonalidade da grade numérica gerada. As cores identificam os cossenos dos ângulos formados pelos lados das células (RIBAS, 2004). É possível observar que a grade gerada apresentou boa ortogonalidade, com ângulos menores que 0,010 em praticamente toda sua extensão.



FIGURA 20. Ortogonalidade da grade numérica para o CEP.

Resolução

A resolução da grade numérica é indicada pela raiz quadrada da área da célula da grade ($R = \sqrt{A}$ sendo A a área da célula da grade) e deve apresentar valores altos, especialmente na área de interesse, onde há a necessidade de resultados mais precisos, levando-se em conta que o tamanho de uma célula não pode ser maior que 1,4 vezes o tamanho da célula adjacente (RIBAS, 2004). Para o

domínio modelado foi construída uma grade numérica com resolução de suas células entre aproximadamente 25 e 1000 metros (Fig. 21).



FIGURA 21. Resolução da grade numérica para o CEP.

Interpolação Batimétrica

Após a aplicação de diversos procedimentos de refinamento e de remanejamento das linhas de grade os dados batimétricos foram interpolados através da aplicação de três diferentes métodos. Devido ao tamanho e geomorfologia da área de estudo o processo de interpolação pôde ser realizado com a definição de apenas um polígono englobando todo o domínio, sendo os métodos de interpolação triangular, média entre células adjacentes e difusão interna empregados de maneira subsequente (RIBAS, 2004). Os dados de batimetria foram obtidos através da digitalização das cartas náuticas 1820 (Fig. 23), 1821 e 1822 do

Complexo Estuarino de Paranaguá, disponíveis no site do Departamento de Hidrografia e Navegação pertencente a Marinha do Brasil.

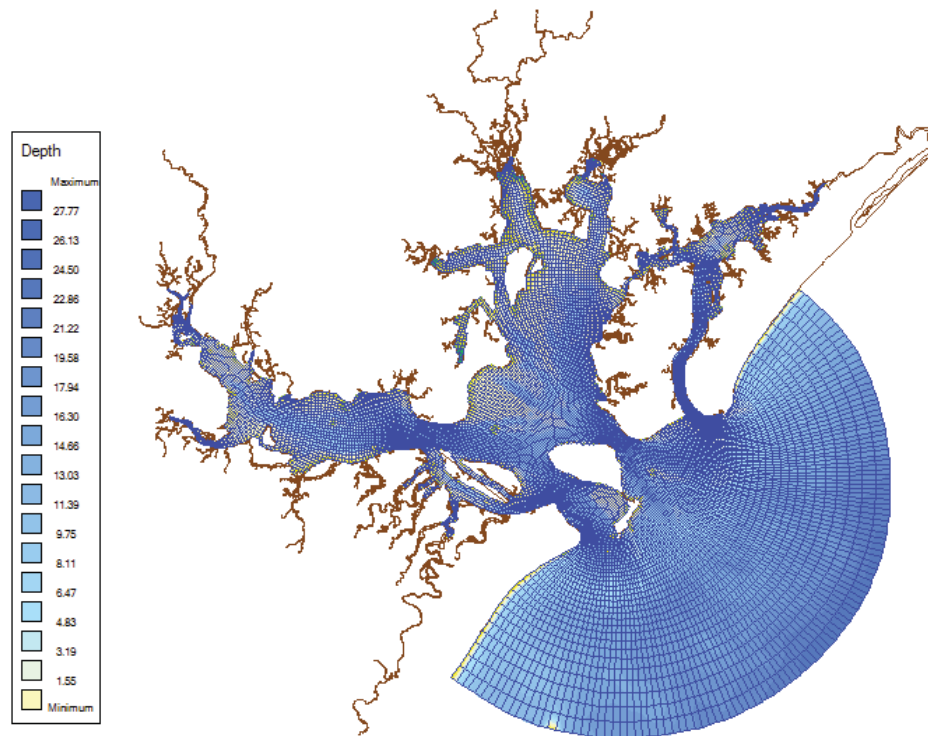


FIGURA 22. Batimetria (metros) da grade numérica para o CEP.

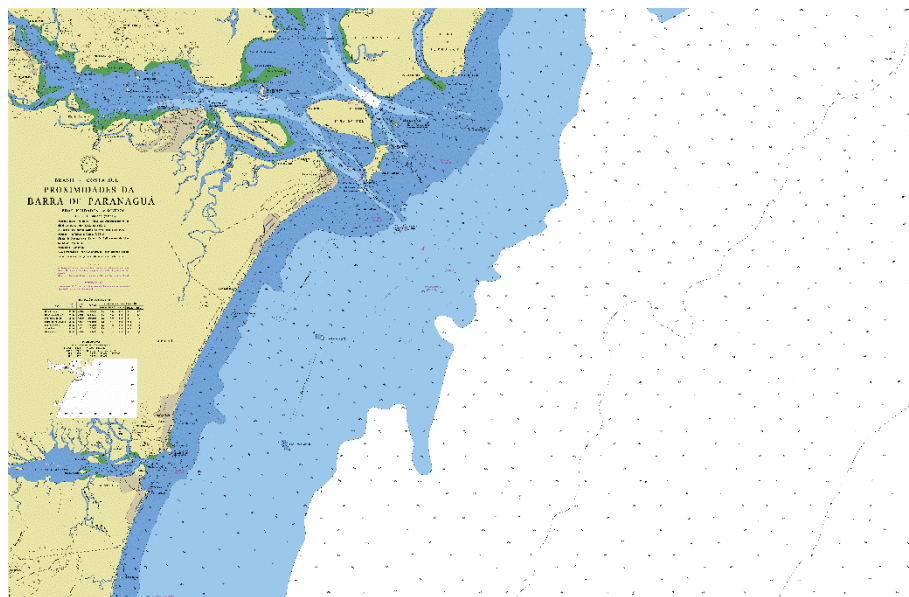


FIGURA 23. Carta náutica utilizada para gerar a batimetria utilizada no modelo delft3D.

4.3.2.3 Parâmetros Delft3D

Os parâmetros utilizados no modelo hidrodinâmico Delft3D são apresentados na tabela 5.

Tabela 5. Parâmetros utilizados no modelo hidrodinâmico Delft3D

Parâmetros da Grade	
Sistema de Coordenadas	Cartesiano
Número de Pontos em M	217
Número de Pontos em N	316
Número de Camadas	10
Espessura das Camadas	1 = 10%; 2 = 30%; 3 = 60%
Constantes Hidrodinâmicas	
Gravidade	9,81 m/s ²
Densidade da Água	1025,0 kg/m ³
Densidade do Ar	1,0 kg/m ³
Coefficientes de Arrasto do Vento	
Coeficiente	Velocidade do Vento
0,0006	0 m/s
0,0072	100 m/s
0,0072	100 m/s
Rugosidade	
Fórmula da Rugosidade	Chezy
Viscosidade	
Viscosidade Turbulenta Horizontal	1,0 m ² /s
Viscosidade Turbulenta Vertical	0,0 m ² /s

5. CARACTERIZAÇÃO DOS CENÁRIOS

5.1 Análise de Frentes Frias

Afim de realizar uma análise estatística, da passagem de sistemas frontais frios na região, foram utilizados dados de pressão atmosférica dos anos de 2013, 2014 e 2015 da estação meteorológica de Paranaguá e feita a contagem da passagem destes sistemas em cada estação do ano. Para a confirmação dos eventos cartas sinóticas foram também utilizadas.

As séries temporais de pressão atmosférica para o ano de 2013, 2014 e 2015 são apresentadas nas Figuras 24, 25 e 26, respectivamente. Para o ano de 2013 (Fig. 24) foram observadas a passagem de 12 frentes frias nos meses de verão (dezembro, janeiro e fevereiro), 11 frentes nos meses de outono (março, abril e maio), 18 sistemas frios nos meses de inverno (junho, julho e agosto) e 15 frentes frias nos meses de primavera (setembro, outubro e novembro), totalizando 56 sistemas frontais frios no ano de 2013.

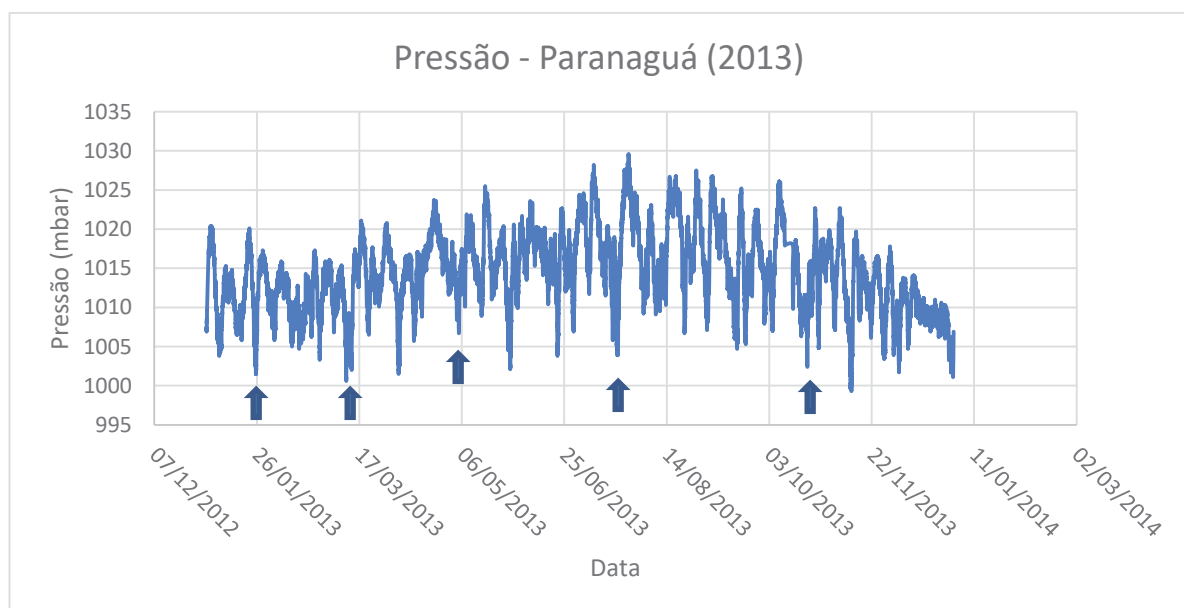


FIGURA 24. Pressão atmosférica da estação meteorológica de Paranaguá do ano de 2013. Setas azuis indicam a passagem de alguns dos sistemas frontais frios, caracterizados pela queda de pressão, no CEP.

No ano de 2014 (Fig. 25) foram caracterizadas a passagem de 55 sistemas frontais frios pelo estuário de Paranaguá, sendo que deste total 11 ocorreram nos meses de verão, 14 nos meses de outono, 15 nos meses de inverno e 15 nos meses referentes a primavera.

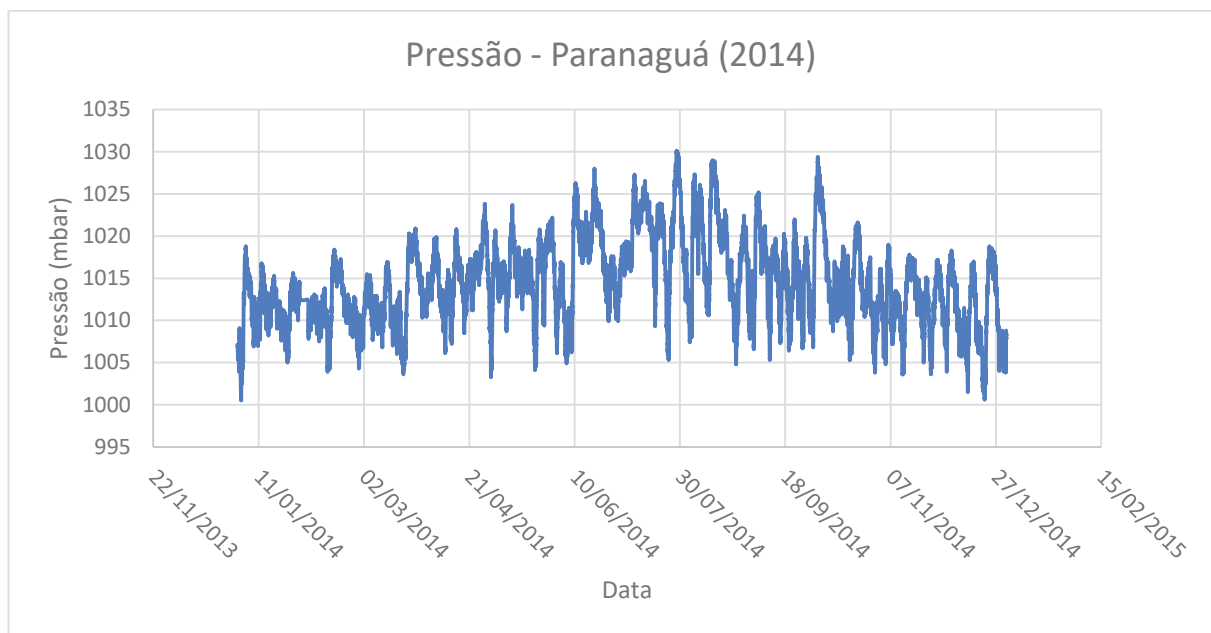


FIGURA 25. Pressão atmosférica da estação meteorológica de Paranaguá do ano de 2014.

Para o ano de 2015 (Fig. 26) foram observadas a passagem de 14 frentes frias nos meses de verão, 14 frentes nos meses de outono, 13 sistemas frios nos meses de inverno e 17 frentes frias nos meses de primavera, totalizando 58 sistemas frontais frios no ano.

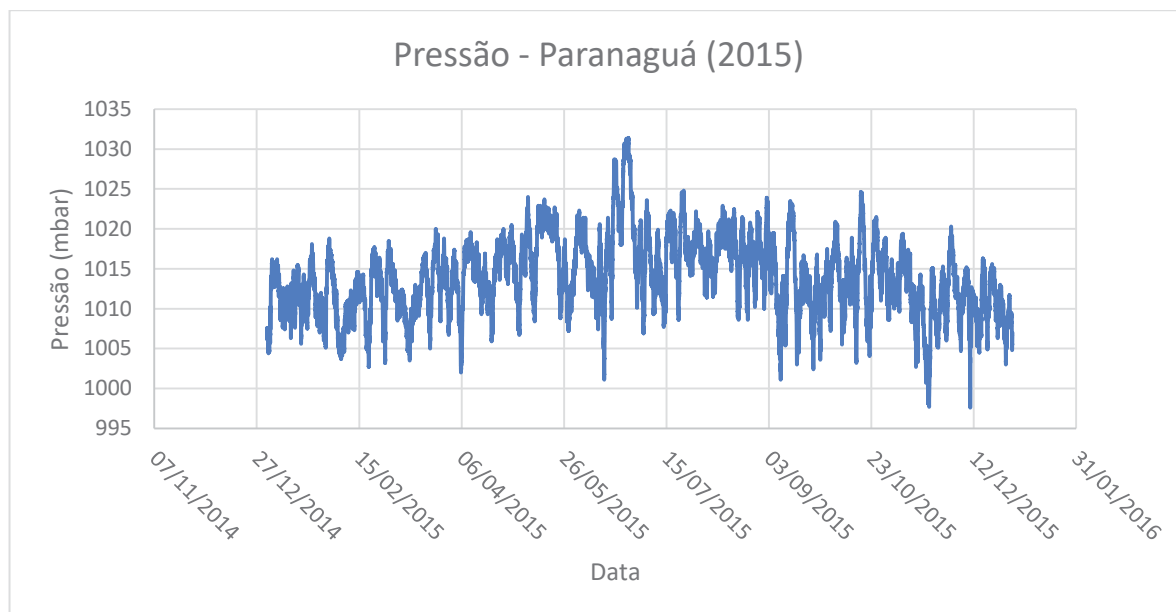


FIGURA 26. Pressão atmosférica da estação meteorológica de Paranaguá do ano de 2015.

A tabela 6 apresenta os resultados encontrados para os três anos em cada estação do ano. Em média ocorreram 56 frentes frias por ano, sendo estas distribuídas ao longo de todo ano, porém apresentando maior incidência, cerca de 55,03%, nos meses de inverno (junho, julho e agosto) e primavera (setembro, outubro e novembro).

Tabela 6. Quantidade de sistemas frontais frios que passaram pelo CEP nos anos de 2013, 2014 e 2015.

Estação / Ano	2013	2014	2015
<i>Verão</i>	12	11	14
<i>Outono</i>	11	14	14
<i>Inverno</i>	18	15	13
<i>Primavera</i>	15	15	17
Total	56	55	58

Em conjunto, dados de velocidade do vento dos anos de 2013, 2014 e 2015 foram analisados afim de verificar as variações nas velocidades do vento com a passagem das frentes frias. A intensidade do vento para o ano de 2013 obtida da estação meteorológica de Paranaguá é apresentada na Figura 27. A velocidade do vento média encontrada foi de 2,0 m/s, enquanto que as velocidades mínima e máxima foram de 0 e 9,9 m/s, respectivamente. Para o ano de 2014 (não apresentado) a maior velocidade do vento foi de 13,1 m/s, a mínima de 0 e a média ficou em torno de 1,9 m/s, em 2015 (não apresentado) as velocidades média e mínima se mantiveram a mesma do ano anterior, apresentando diferença apenas no pico de velocidade máxima que foi de 11,5 m/s. É importante citar que, nos três anos analisados as maiores velocidades do vento (acima de 8,0 m/s) ocorreram quando houve a passagem ou aproximação de um sistema frio na região.

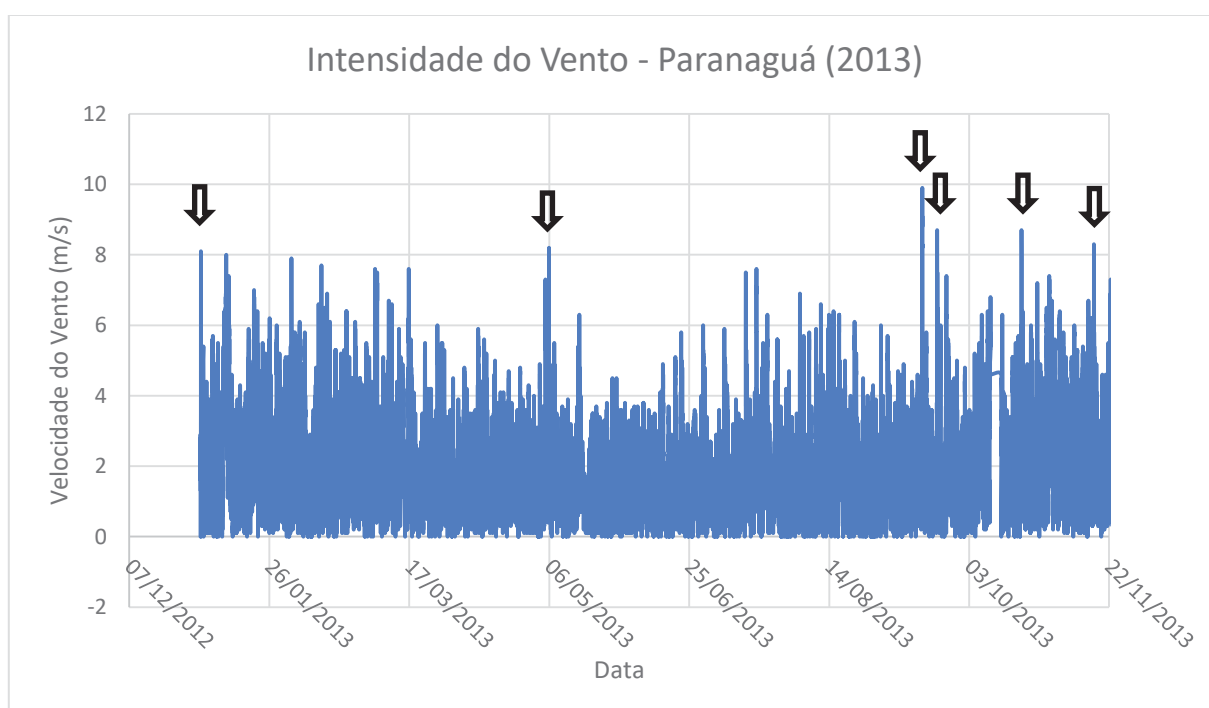


FIGURA 27. Intensidade do vento estação de Paranaguá para o ano de 2013. Setas indicam picos de velocidade do vento (acima de 8,0 m/s) ocorridas em conjunto com a passagem de sistemas frontais frios.

5.2 Cenários

5.2.1 Cenário 1 - Verão

A partir da análise das cartas sinóticas foi possível observar a passagem de uma frente fria na região de interesse entre os dias 28/01/2015 e 01/02/2015 (Fig. 28). A passagem da frente fria no Complexo Estuarino de Paranaguá ocorreu nas primeiras horas do dia 30 de janeiro de 2015 como observado na Figura 28. Nota-se que o núcleo da frente (zona de baixa pressão) está localizado em alto mar e o ramo frio do sistema frontal está localizado sobre o CEP (quadrante B da imagem).

Para a confirmação do evento foram analisados dados de velocidade do vento e pressão do ar da estação meteorológica de Paranaguá pertencente ao Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR) e da estação do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) localizada na Ilha do Mel.

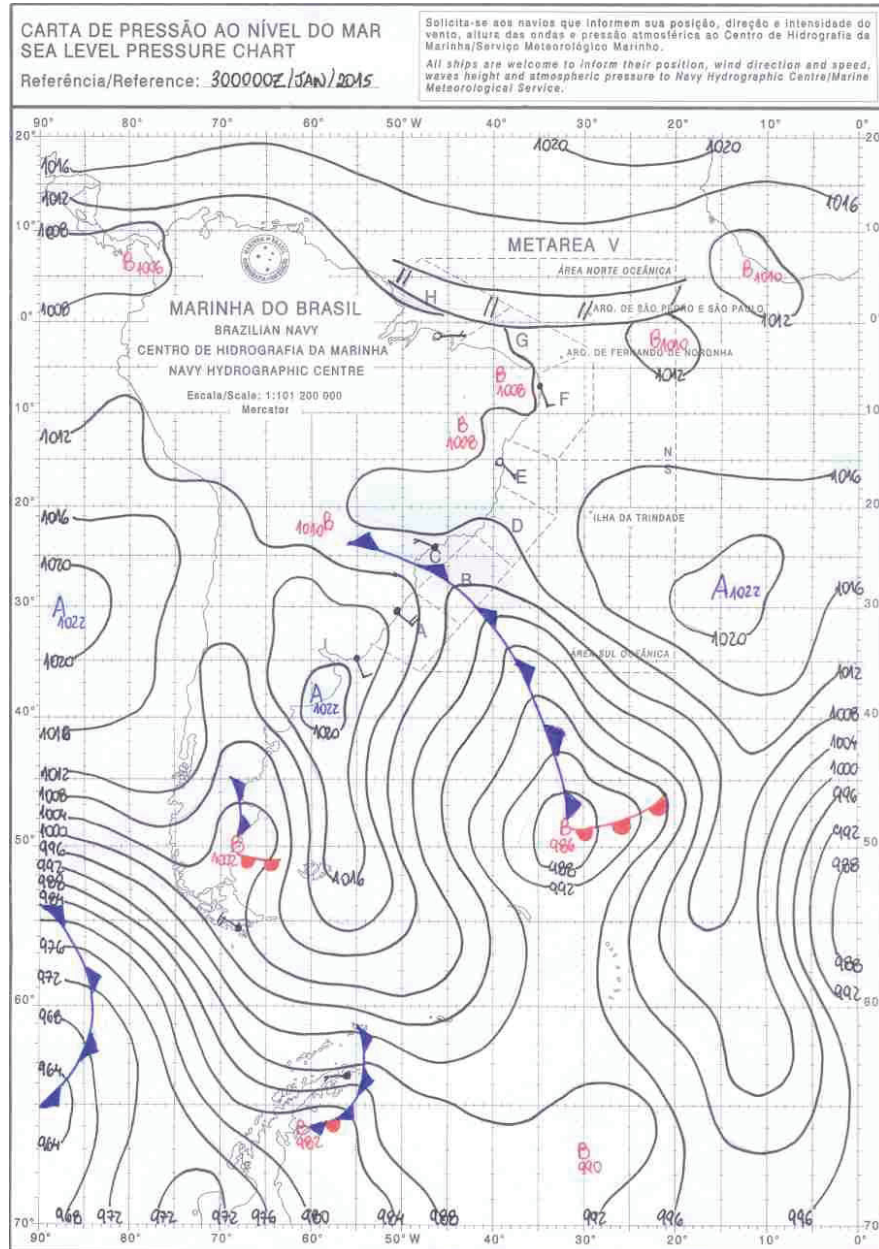


FIGURA 28. Carta sinótica demonstrando a passagem de um sistema frontal frio sobre o complexo estuarino de Paranaguá (quadrante B) às 0 horas do dia 30 de janeiro de 2015.

A variação da velocidade do vento para o período de 14/01/2015 a 27/02/2015 das estações meteorológicas de Paranaguá e da Ilha do Mel são apresentadas nas Figuras 29 e 30, respectivamente. Durante o período nas duas estações foram observados picos de velocidades máximas próximos ao dia 30 de janeiro, cerca de 10,0 para estação de Paranaguá e 8,0 m/s para a estação da Ilha do Mel, mesmo período em que foi caracterizada a entrada de um sistema frontal no CEP através do uso das cartas sinóticas. Estes valores máximos da velocidade do vento nas estações corroboram com a informação obtida das cartas sinóticas de que

ocorreu a entrada de uma frente fria na área de interesse entre os dias 28/01/2015 e 01/02/2015.

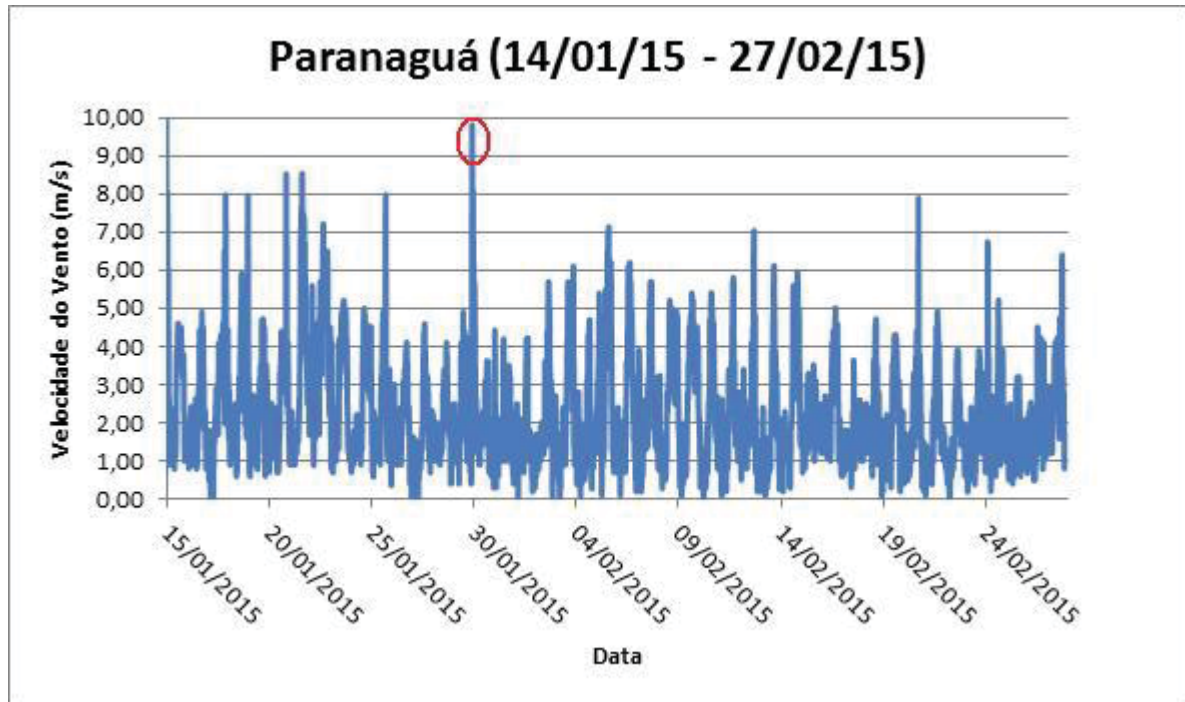


FIGURA 29. Velocidade do Vento Estação Paranaguá de 14/01/2015 a 27/02/2015. Em vermelho ponto de velocidade máxima durante a passagem de um sistema frontal no CEP.

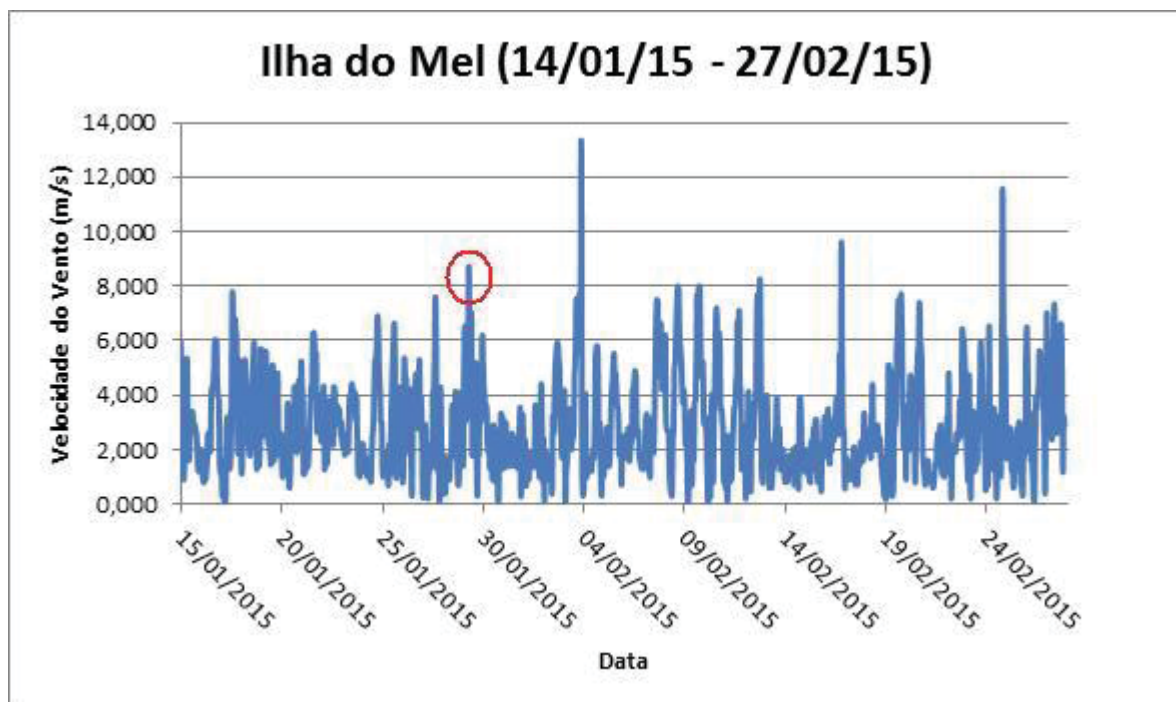


FIGURA 30. Velocidade do Vento Estação Ilha do Mel de 14/01/2015 a 27/02/2015. Em vermelho ponto de velocidade máxima durante a passagem de um sistema frontal no CEP.

Como visto anteriormente, é possível realizar a identificação da passagem de sistemas frontais frios através da utilização de dados de pressão atmosférica. Devido a isto, dados de pressão do ar das estações meteorológicas da Ilha do Mel e de Paranaguá foram utilizados para auxiliar na caracterização dos cenários escolhidos.

Na Figura 31 é apresentada a série temporal de pressão atmosférica da Ilha do Mel entre os dias 15/01/2015 e 15/02/2015. Durante o período é possível observar a passagem da frente fria devido a diminuição da pressão próximo do dia 30 de janeiro com o conseqüente aumento repentino. Este fato é melhor observado na Figura 32, que apresenta os valores de pressão do ar durante a passagem do sistema frontal identificado nas cartas sinóticas, denominado de Cenário 01 (28/01/2015 a 01/02/2015).

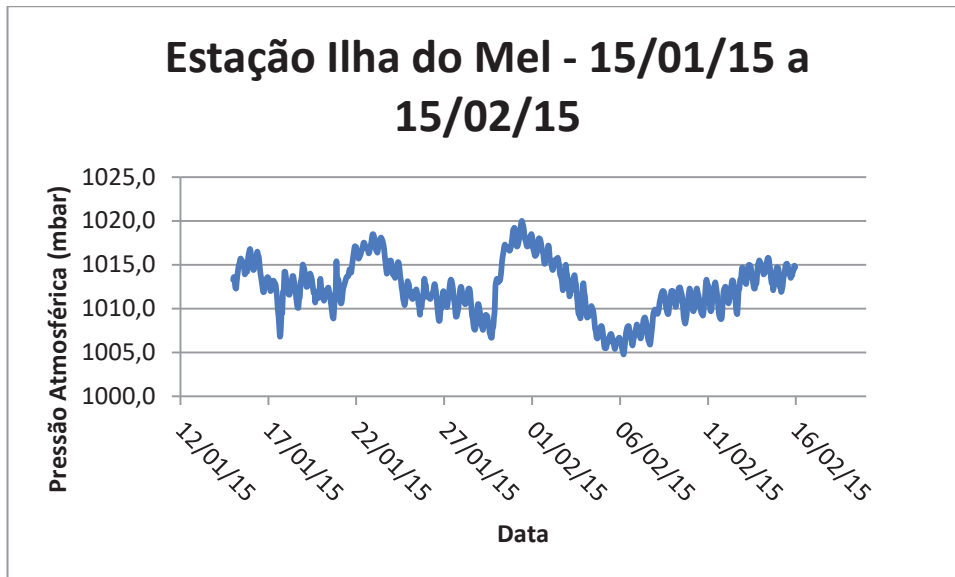


FIGURA 31. Pressão do ar estação Ilha do Mel do período de 15/01/2015 a 15/02/2015.

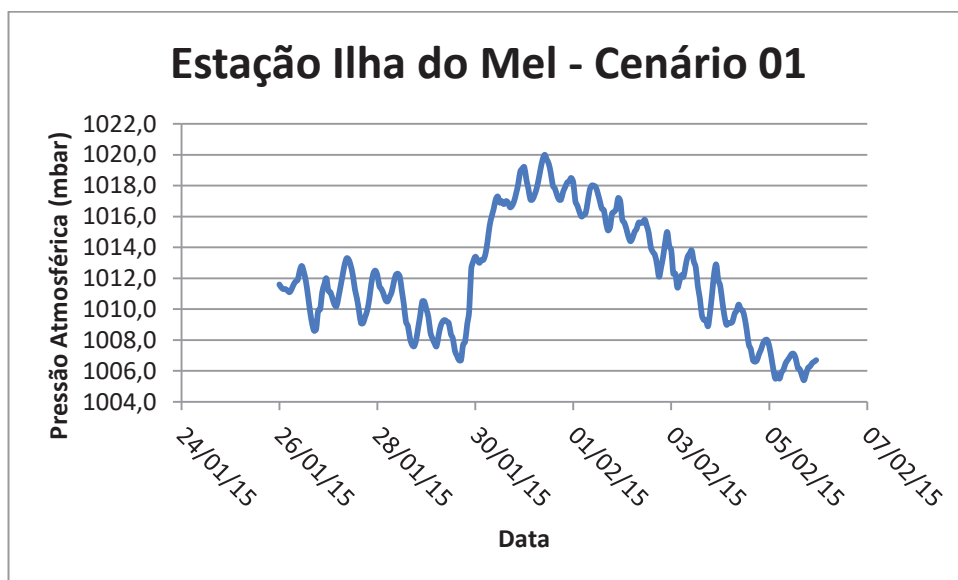


FIGURA 32. Pressão do ar estação Ilha do Mel para o cenário 01.

A Figura 33 apresenta a pressão atmosférica dos dias 15/01/2015 a 15/02/2015 da estação meteorológica de Paranaguá. Assim como observado na série de dados da estação da Ilha do Mel, nota-se para Paranaguá a mesma queda e aumento repentino da pressão entre os dias 28/01/2015 e 01/02/2015 (Fig. 34), mesmo período em que ocorreu a passagem do sistema frontal.

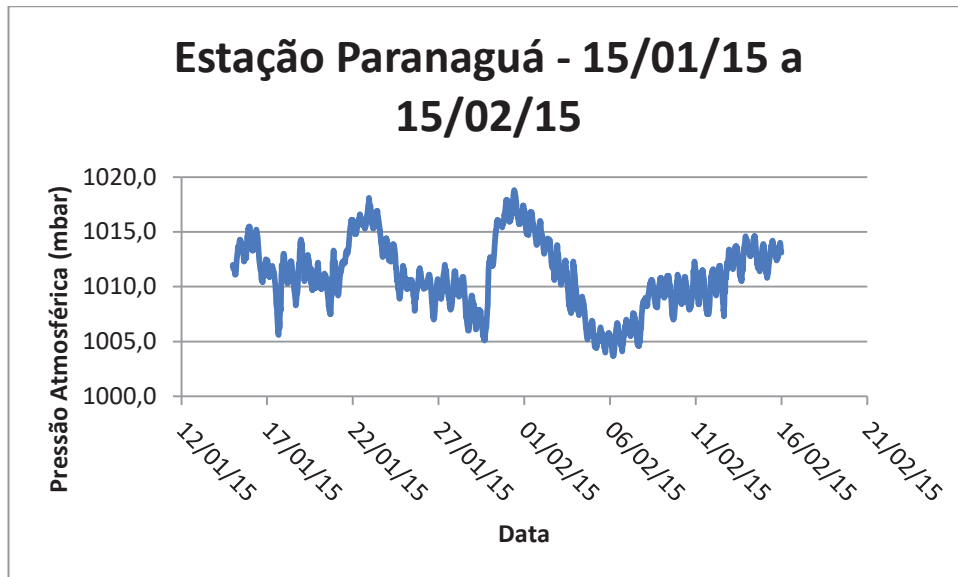


FIGURA 33. Pressão do ar estação Paranaguá do período de 15/01/2015 a 15/02/2015.

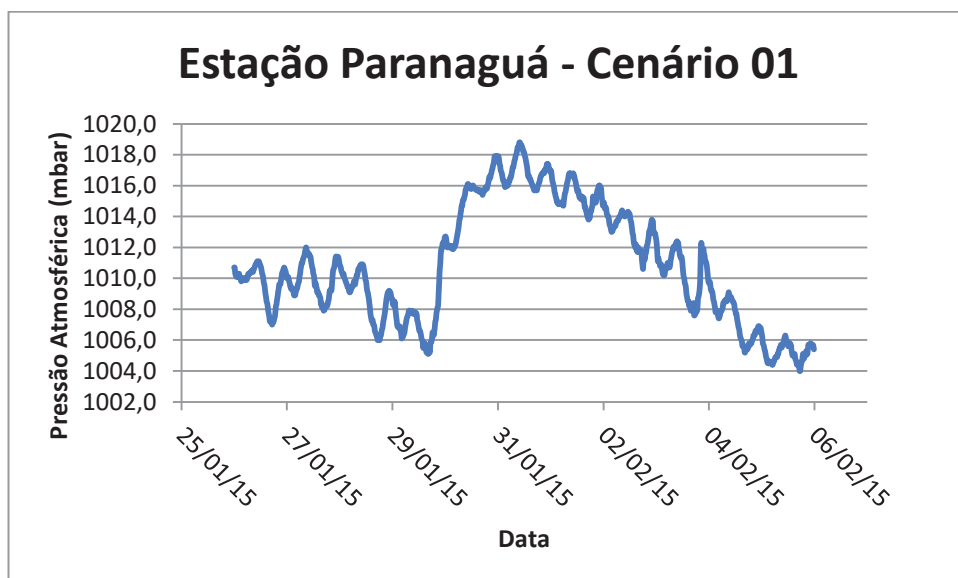


FIGURA 34. Pressão do ar estação Paranaguá para o cenário 01.

5.2.2 Cenário 02 - Inverno

Com o intuito de analisar a passagem de um sistema frontal frio durante o inverno, através das cartas sinóticas foi identificado a passagem de uma frente fria em Paranaguá entre os dias 18 e 21 de agosto de 2015 (Cenário 02). O ramo frio da

frente passou sobre o estuário de Paranaguá nas últimas horas do dia 19/08/2015 sendo que núcleo do sistema frontal também se deslocou sobre a região (Fig. 35).

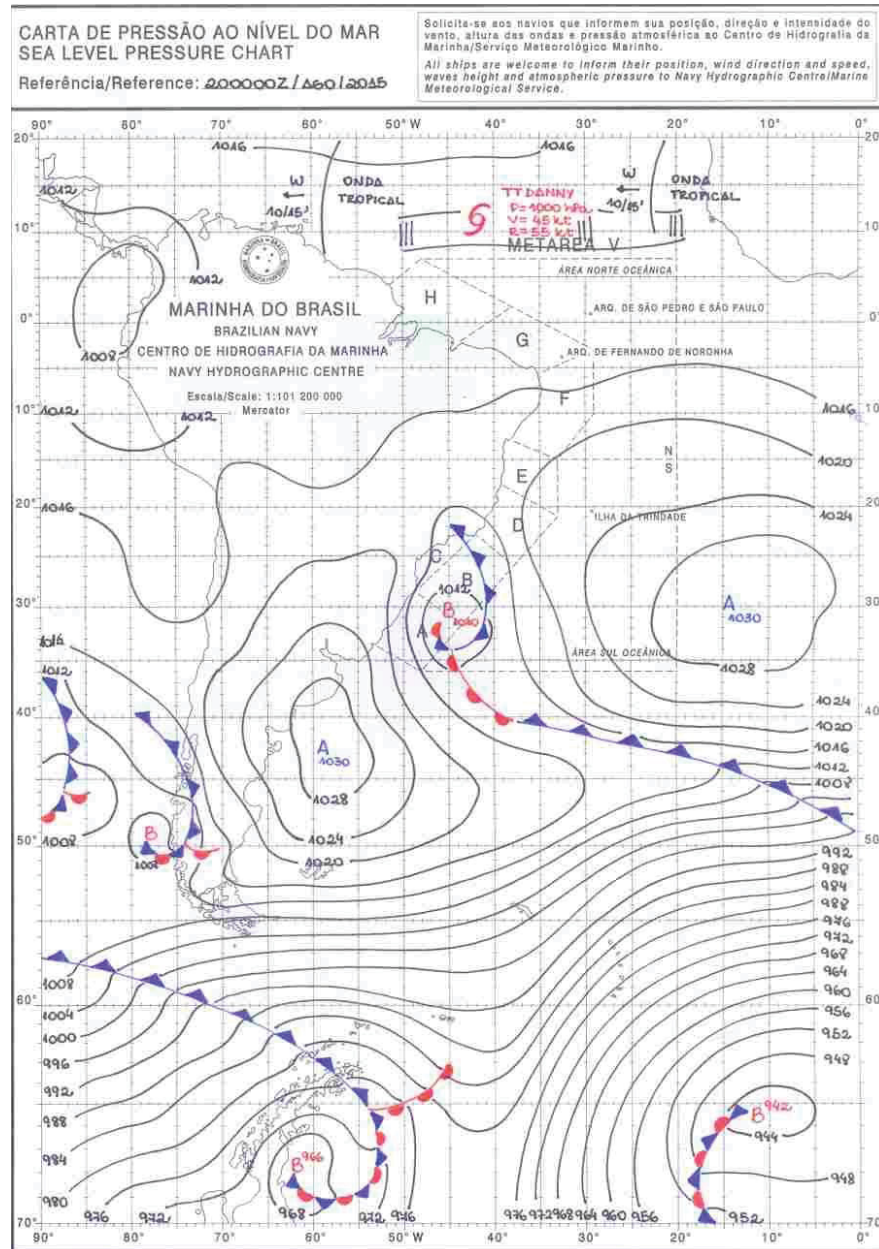


FIGURA 35. Carta sinótica demonstrando a passagem de um sistema frontal frio sobre o complexo estuarino de Paranaguá (quadrante B) as 0 horas do dia 20 de agosto de 2015.

Na Figura 36 é apresentada a velocidade do vento observada na estação meteorológica de Paranaguá para o período correspondente ao Cenário 2. Observa-

se que entre os dias 19 e 20 de agosto ocorre um ponto de máxima velocidade de cerca de 5,5 m/s. Este valor máximo de velocidade do vento na estação corrobora com a informação obtida das cartas sinóticas de que ocorreu a entrada de uma frente fria na área de interesse entre os dias 18/08/2015 e 21/08/2015.

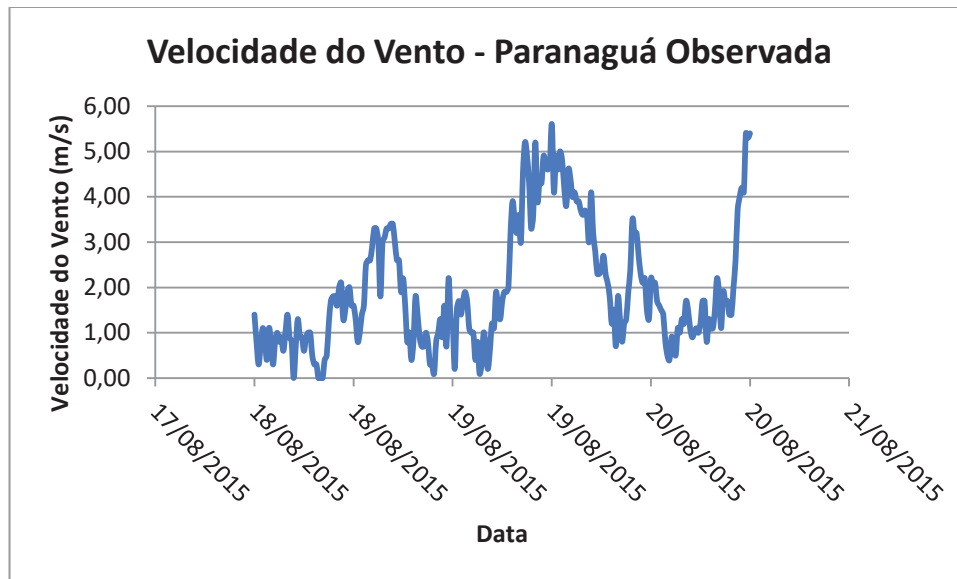


FIGURA 36. Velocidade do Vento observada na estação meteorológica de Paranaguá no período de 18/08/2015 a 21/08/2015.

Observa-se na Figura 37 a pressão atmosférica do mês de agosto de 2015 para a estação Ilha do Mel. Durante o mês de agosto é possível notar a passagem de pelo menos quatro sistemas frios pela Ilha do Mel. No período escolhido (Fig. 38) observa-se claramente a diminuição da pressão do ar durante o dia 19 de agosto com o aumento abrupto durante as horas seguintes, confirmando a passagem da frente na região. Nos dados de pressão atmosférica da estação de Paranaguá também é possível verificar a passagem dos sistemas frontais durante o mês de agosto (Fig. 39) e confirmar a passagem da frente no estuário de Paranaguá durante o Cenário 02 (Fig. 40).

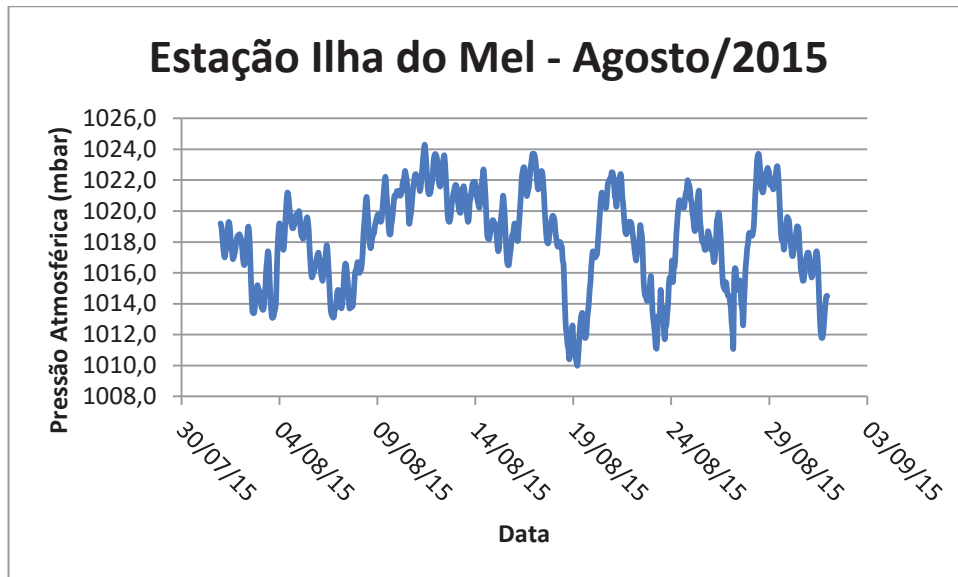


FIGURA 37. Pressão do ar estação Ilha do Mel correspondente ao mês de agosto de 2015.

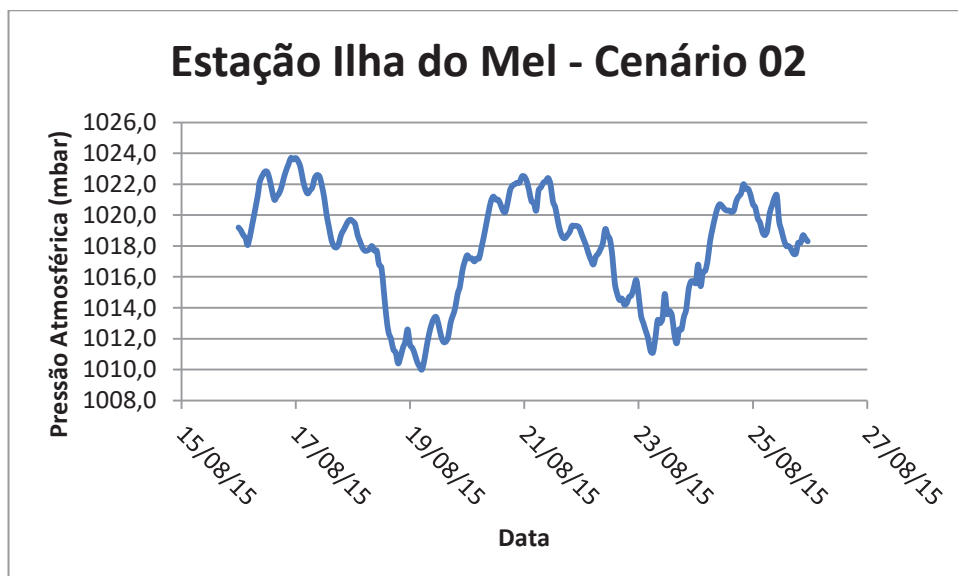


FIGURA 38. Pressão do ar estação Ilha do Mel correspondente ao Cenário 02.

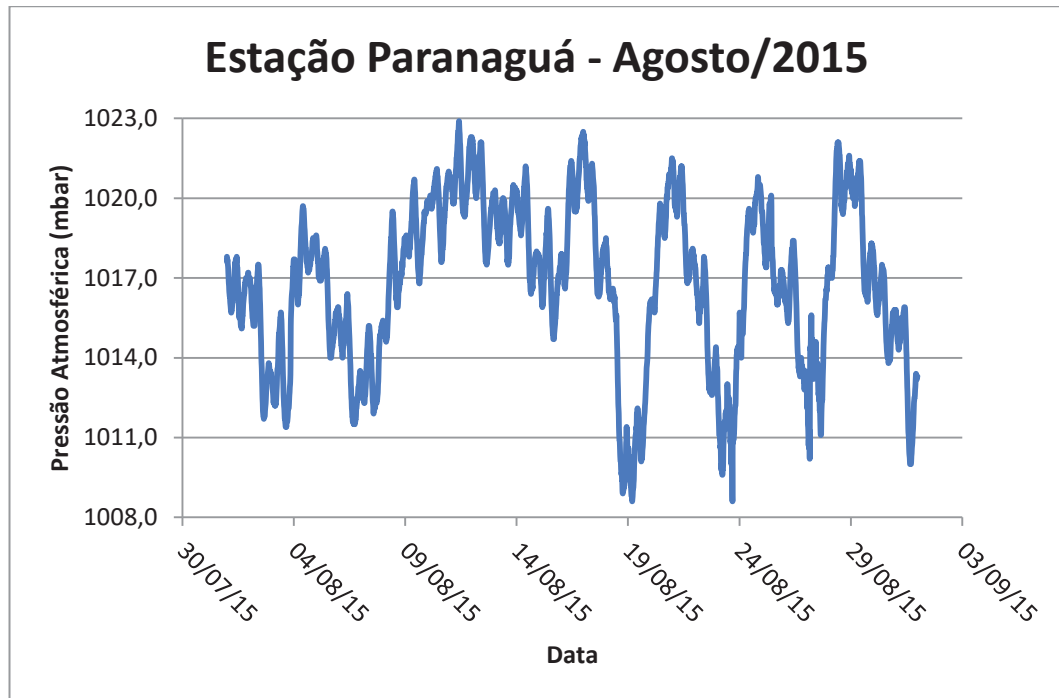


FIGURA 39. Pressão do ar estação Paranaguá correspondente ao mês de agosto de 2015.

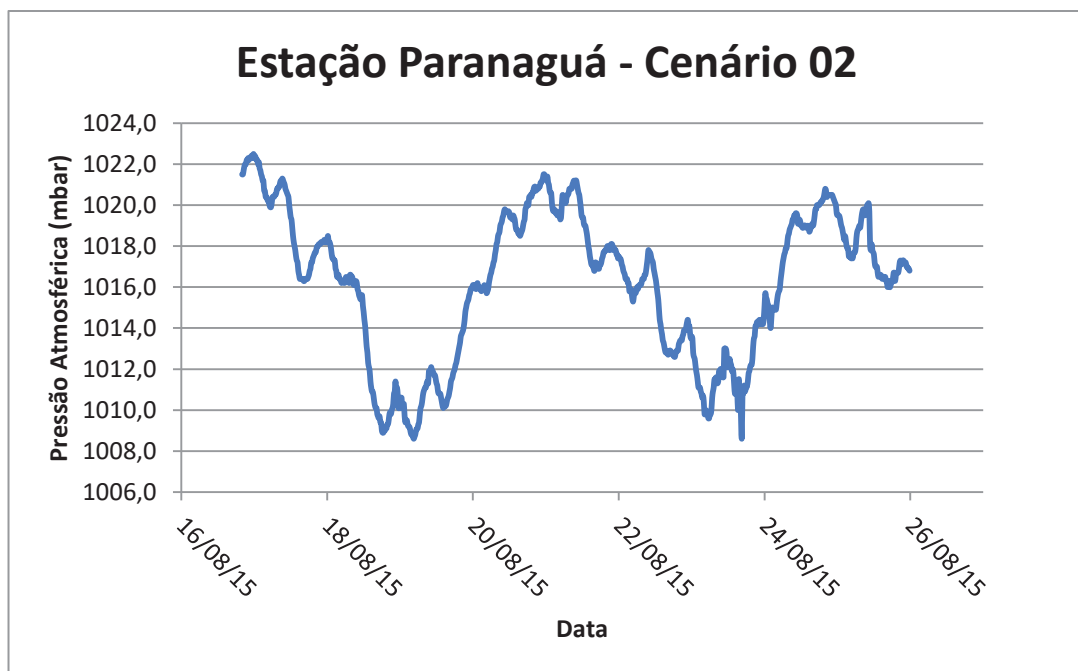


FIGURA 40. Pressão do ar estação Paranaguá correspondente ao Cenário 02.

6. ANÁLISES PRELIMINARES

Com o objetivo de analisar o efeito isolado do vento na circulação do estuário de Paranaguá foram realizados dois testes preliminares. O primeiro teste utilizou dados de maré observados, e realizado uma análise harmônica destes dados, com o intuito de isolar o efeito da maré na hidrodinâmica do CEP e avaliar o efeito de outras forçantes na dinâmica estuarina. O segundo teste avaliou a influência da direção do vento na hidrodinâmica do estuário através da simulação de dois cenários com diferentes direções do vento.

6.1 Maré

A partir da análise harmônica de uma série de dados observados de maré para o estuário de Paranaguá, foram extraídas as principais constituintes harmônicas (Tabela 7) para o local e então realizada uma previsão da maré para o período de 23/07/1996 a 22/08/1996, mesmo período dos dados da estação maregráfica de Paranaguá disponíveis. Foram então realizados testes com a maré predita e com os dados observados com o intuito de analisar a influência de outras forçantes (ação do vento, das ondas, dos rios, da pressão, erros de modelagem, etc.) nas variações de níveis do mar e na hidrodinâmica local. O nível de referência utilizado para esta análise foi o nível estabelecido para a região de Paranaguá de 0,90 m.

TABELA 7. Principais constantes harmônicas da maré para Paranaguá obtidas através da análise harmônica de dados observados.

Constante	Período (h)	Amplitude (m)	Fase (rad)
SK3	354,37	0,0967	0,23
S4	28,01	0,0065	5,17
S2	26,87	0,3415	2,02
Q1	25,82	0,0422	0,46
OO1	24,83	0,0306	4,02
O1	23,93	0,1026	0,91
N2	23,10	0,09	2,15
MSf	22,31	0,0876	4,76
MS4	21,58	0,0544	6,13
MO3	12,66	0,102	6,12
MN4	12,42	0,0868	2,91
MK3	12,00	0,0539	3,07
M8	11,75	0,0024	5,34
M6	8,39	0,0058	1,82
M4	8,28	0,1619	3,91
M3	8,18	0,178	4,02
M2	7,99	0,4776	1,25
M1	6,27	0,008	5,79
KQ1	6,21	0,0153	3,20
KJ2	6,10	0,0134	2,56
K1	6,00	0,11	2,75
J1	4,93	0,0025	0,14
3MK7	4,80	0,0062	2,59
2SM6	4,17	0,008	4,01
2SK5	4,14	0,0049	6,14
2Q1	4,09	0,0148	1,08
2MS6	4,05	0,0115	2,82
2MN6	3,53	0,0047	5,40
2MK5	3,11	0,0074	6,22

As Figuras 41 e 42 apresentam o gráfico da maré observada e predita, respectivamente. Em ambos os gráficos, em cerca de 30 dias de dados é possível observar as variações entre as marés de quadratura e as marés de sizígia. Para o período observado o nível médio, máximo e mínimo encontrados foram 1,71; 2,87; 0,43 metros, respectivamente. Enquanto que para os dados de previsão da maré o nível médio foi cerca de 1,71m, máximo de 2,78m e mínimo de 0,39m. As duas imagens sobrepostas são apresentadas na Figura 43, sendo possível notar as pequenas diferenças entre as duas séries de dados. As diferenças entre a maré

observada e a previsão realizada foram de $2,21 \times 10^{-5}$ m entre as médias, cerca de 0,083 m entre os níveis máximos e 0,031 m entre os níveis mínimos. A partir da análise dos dados e dos gráficos nota-se que a previsão condiz com os dados observados, tornando útil a análise da influência de outras forçantes na hidrodinâmica do CEP.

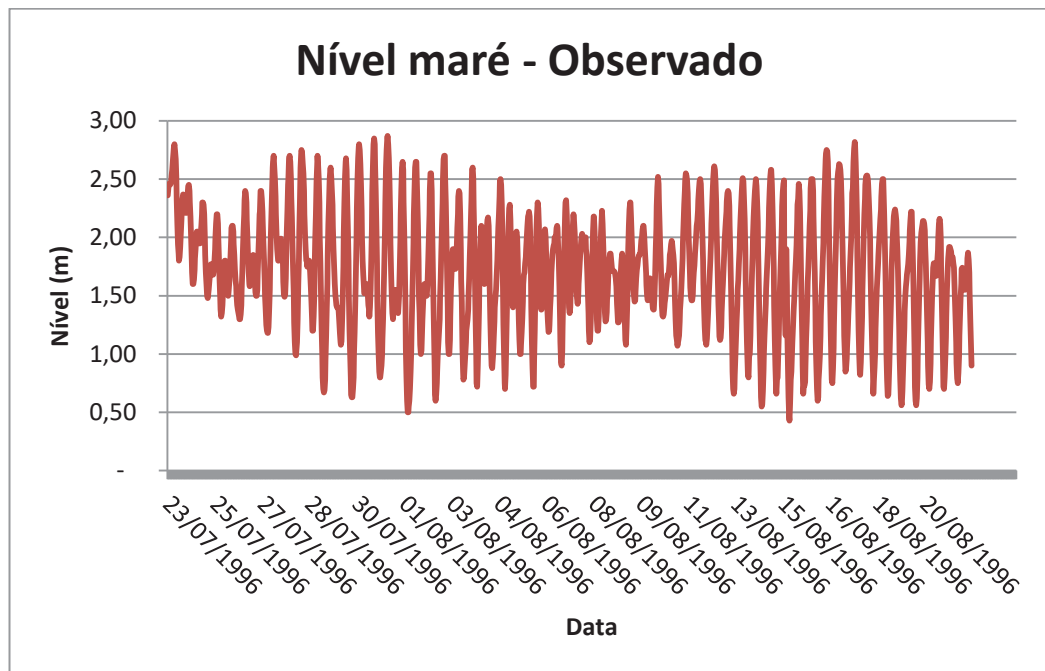


FIGURA 41. Nível de maré observada em Paranaguá no período de 23/07/1996 a 22/08/1996.

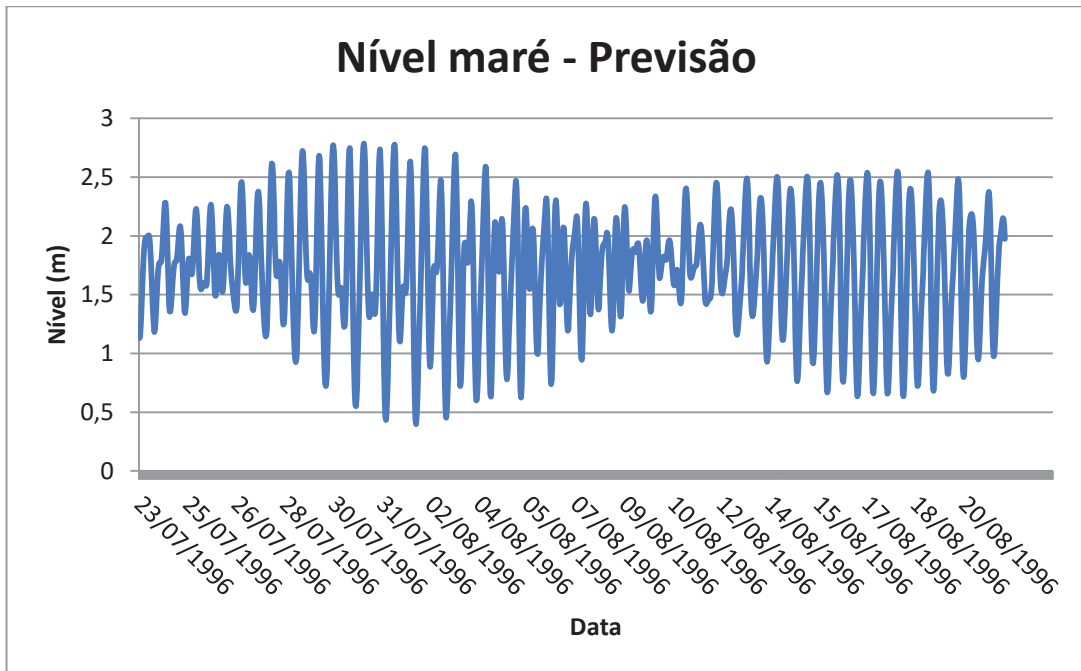


FIGURA 42. Previsão do nível de maré para Paranaguá para o período de 23/07/1996 a 22/08/1996.

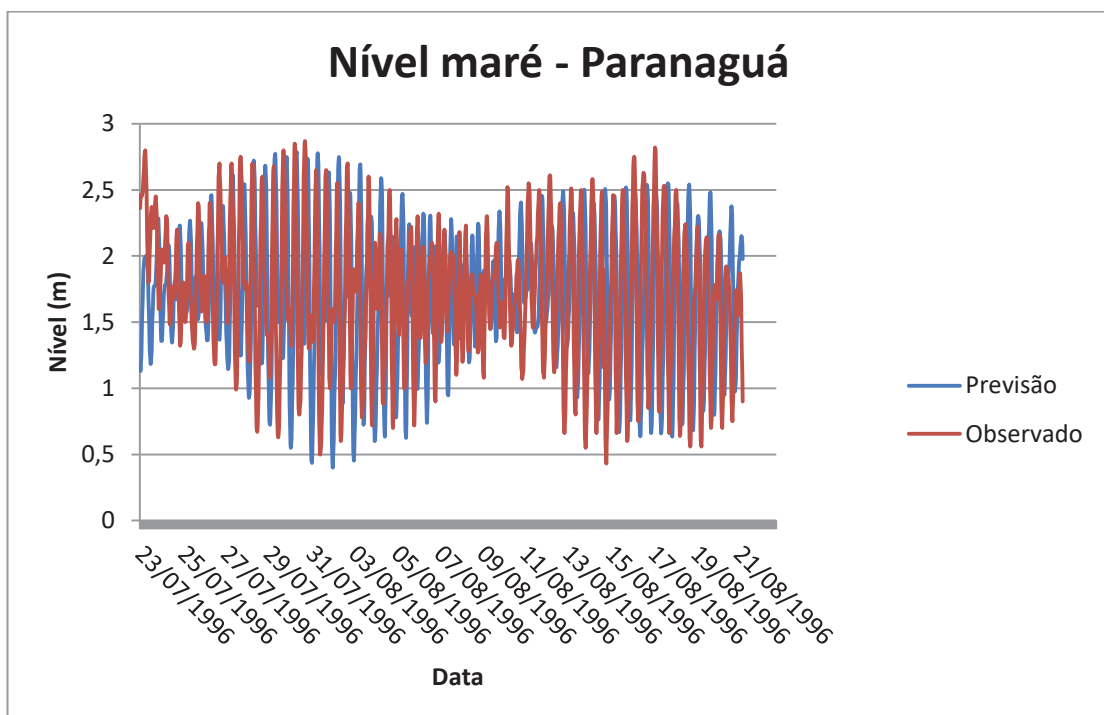


FIGURA 43. Previsão e nível de maré observada em Paranaguá para o período de 23/07/1996 a 22/08/1996.

Para análise das outras forçantes (Fig. 44), nas variações de nível do mar e na hidrodinâmica estuarina os dados preditos foram subtraídos dos dados observados restando apenas valores correspondentes às variações devido a outras perturbações como a ação do vento, das ondas, dos rios, da pressão e até mesmo de erros gerados durante a simulação da maré.

Observa-se que os valores oscilam entre o valor mínimo de -0,44 m e máximo 0,43 m, apresentando o valor médio de -0,01 m. Nota-se que a maré é um fator predominante nas variações de níveis do estuário, correspondendo a cerca de 99,8% das variações de níveis. Apesar de corresponderem a apenas 0,2% a ação de outras forçantes também desempenha um papel importante na hidrodinâmica estuarina, podendo causar alterações de até cerca de 0,40 m no nível médio de água do estuário. Tomando as baías de Antonina e Paranaguá, que representam cerca de 260 km² da área total do CEP, como exemplo, uma alteração de 40 cm na coluna de água representa cerca de $1,04 \times 10^8$ m³ de água entrando ou saindo do estuário.

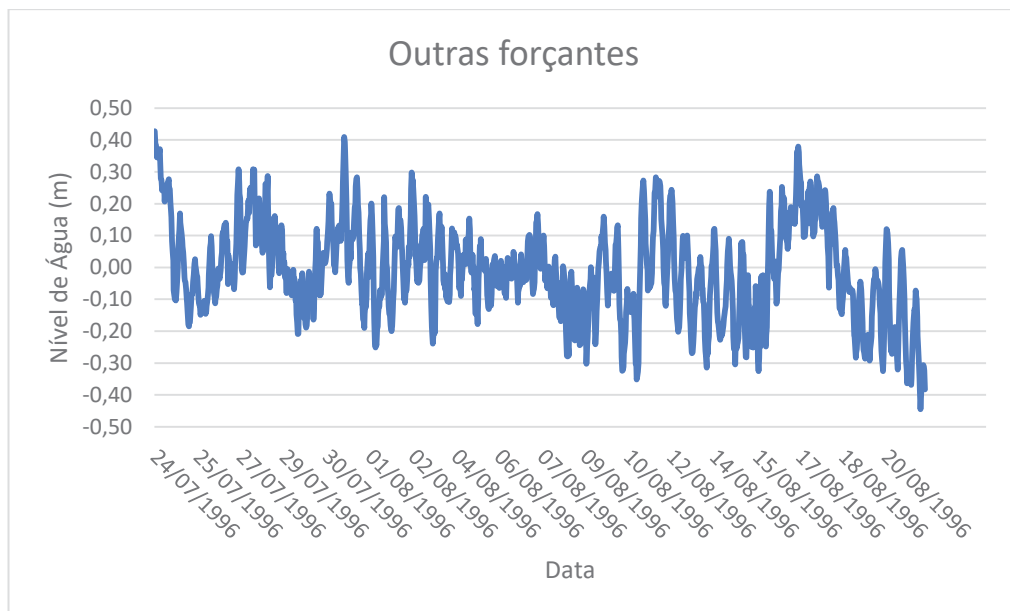


FIGURA 44. Ação de outras forçantes, diferentes da maré, presente nas variações de nível da maré para o período de 23/07/1996 a 22/08/1996.

Para avaliar a influência do vento nos ruídos (Fig. 44) foram analisados dados de velocidade do vento da estação meteorológica de Paranaguá (Lat. $-25^{\circ},53'$; Lon. $-48^{\circ},51'$). A Figura 45 apresenta a velocidade do vento de Paranaguá no período de 23/07/1996 a 22/08/1996. O valor máximo de velocidade observado foi de 5,5 m/s, o valor mínimo foi de 0 e a velocidade média do vento ficou em torno de 1,71 m/s. Para este período não foi possível encontrar relações entre as variações na intensidade do vento e os ruídos obtidos através da análise harmônica da maré.

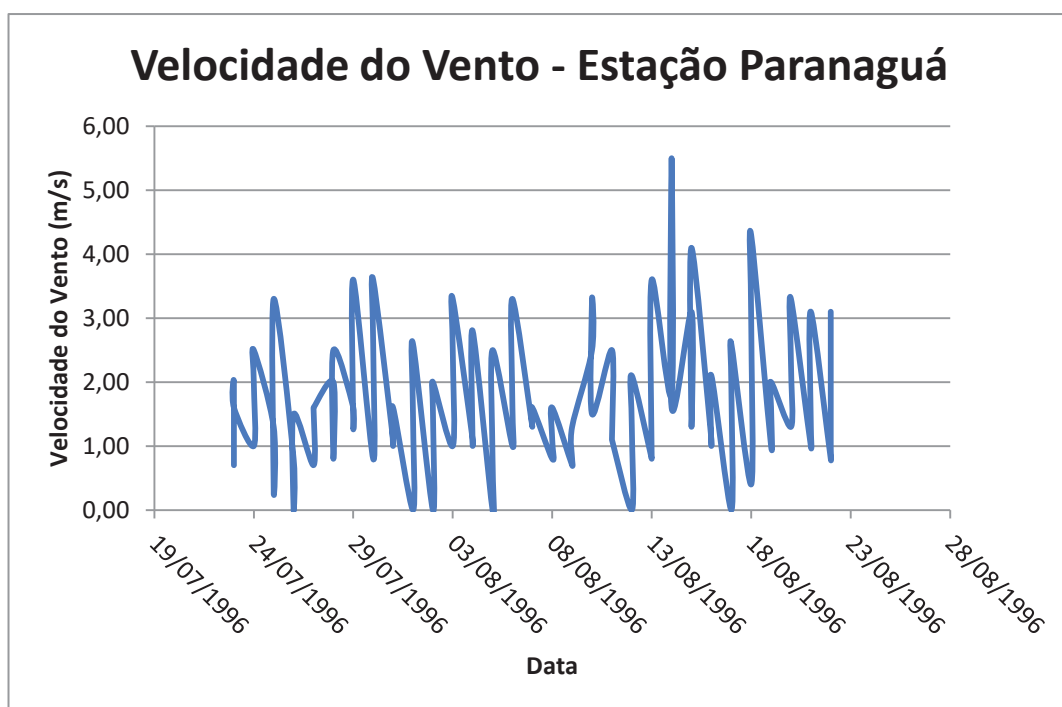


FIGURA 45. Velocidade do vento observada na estação meteorológica de Paranaguá no período de 23/07/1996 a 22/08/1996.

Para avaliar a influência de erros gerados pelo cálculo da maré foram também extraídas as principais constantes harmônicas da maré (Tabela 8) a partir da série de dados gerada pelo modelo hidrodinâmico Delft3D, considerando somente a maré como forçante, e feita uma previsão para o mesmo período de dados (28/01/2015 a 28/01/2015). O nível de referência utilizado para esta análise é de 0,0 m e o ponto escolhido para análise localiza-se em Paranaguá (Fig.46).

TABELA 8. Principais constantes harmônicas extraídas a partir da análise harmônica da série de dados gerada pelo modelo hidrodinâmico Delft3D.

Constante	Periodo (h)	Amplitude (m)	Fase (rad)
MSf	354,37	0,0073	0,07
2Q1	28,01	0,0017	4,60
Q1	26,87	0,0287	1,46
O1	25,82	0,1153	2,18
M1	24,83	0,0049	1,83
K1	23,93	0,0821	3,67
J1	23,10	0,0065	0,89
OO1	22,31	0,0027	0,11
KQ1	21,58	0,0038	6,14
N2	12,66	0,0573	3,99
M2	12,42	0,441	3,14
S2	12,00	0,4068	3,43
KJ2	11,75	0,0622	0,82
MO3	8,39	0,0052	1,00
M3	8,28	0,0014	1,80
MK3	8,18	0,0067	2,15
SK3	7,99	0,0043	1,14
MN4	6,27	0,0076	2,74
M4	6,21	0,016	2,52
MS4	6,10	0,0449	2,57
S4	6,00	0,018	3,35
2MK5	4,93	0,0025	0,28
2SK5	4,80	0,0009	1,20
2MN6	4,17	0,0007	5,14
M6	4,14	0,0026	4,97
2MS6	4,09	0,0047	4,91
2SM6	4,05	0,0041	4,98
3MK7	3,53	0,0008	0,77
M8	3,11	0,0005	2,42

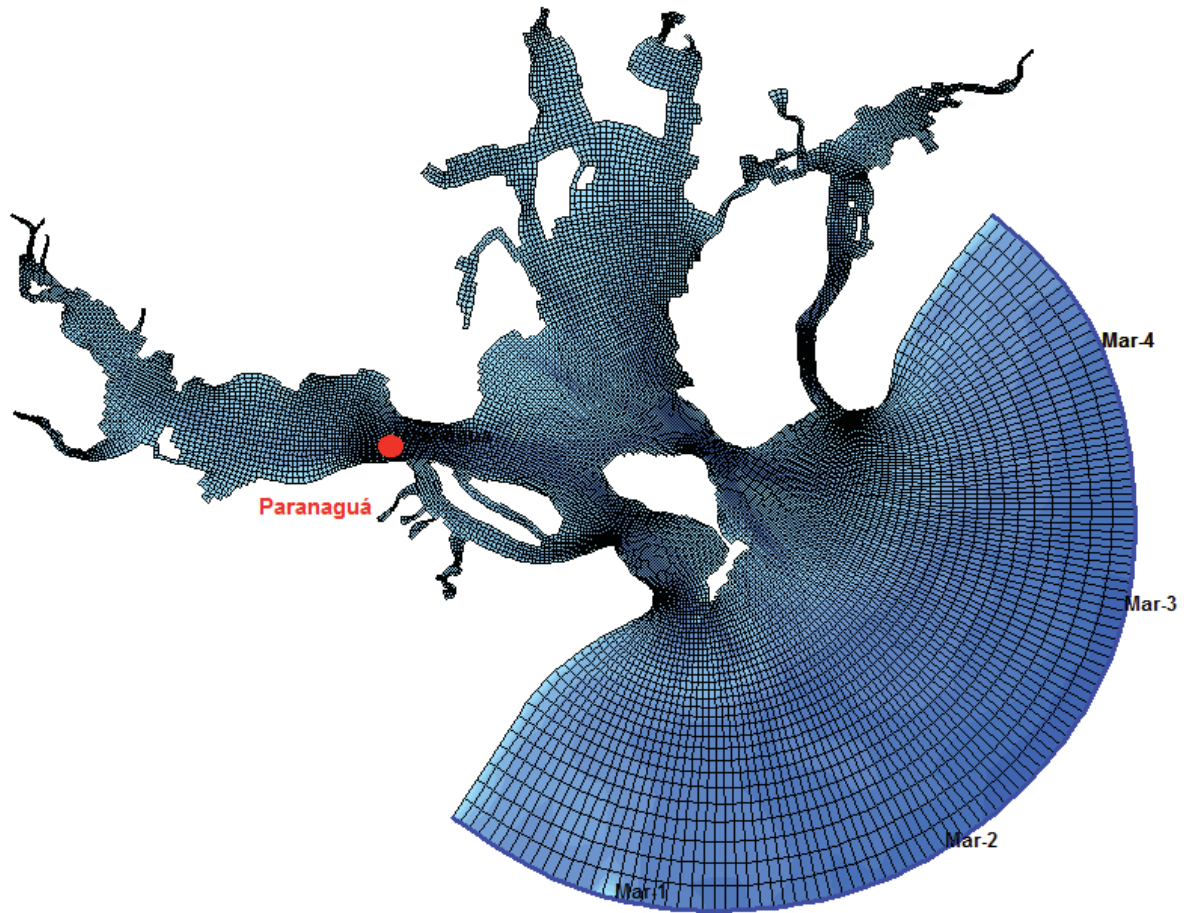


FIGURA 46. Grade do modelo hidrodinâmico Delft3D demonstrando a localização do ponto de observação em Paranaguá.

As Figuras 47 e 48 apresentam o gráfico da maré gerada pelo modelo hidrodinâmico Delft3D e a previsão da maré para o período de 28/01/2015 a 28/02/2015, respectivamente. Para a maré simulada o nível médio, máximo e mínimo encontrados foram 0,004; 0,97; -1,1 metros, respectivamente. Enquanto que para os dados de previsão da maré o nível médio ficou em torno dos 0m, o nível máximo foi de 0,98m e o mínimo de -1,09m. As diferenças entre a maré modelada e a previsão realizada foi de -0,004 m para os níveis médios, entre os níveis máximos foi de cerca de 0,01 m e -0,008 m entre os níveis mínimos.

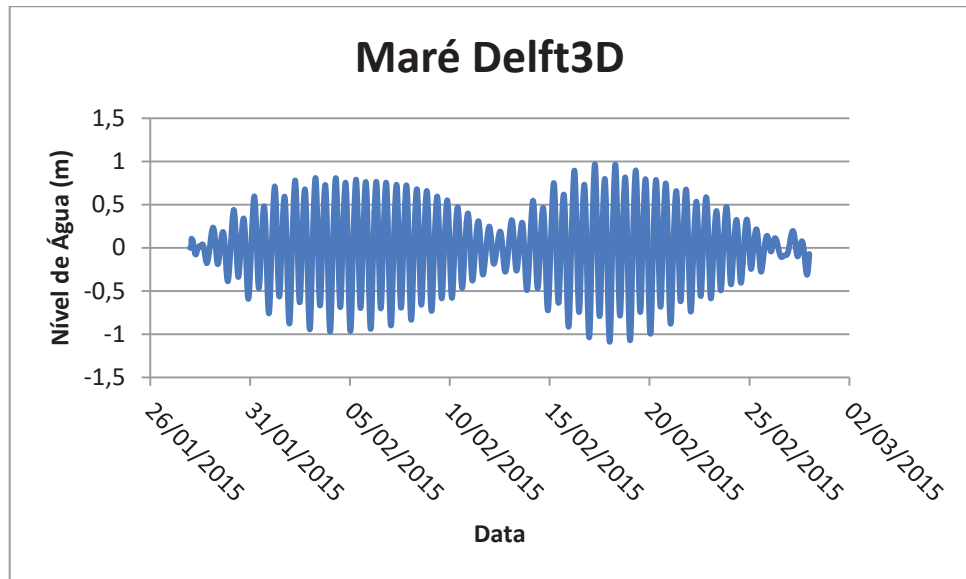


FIGURA 47. Nível de maré modelada para Paranaguá no período de 28/01/2015 a 28/02/2015.

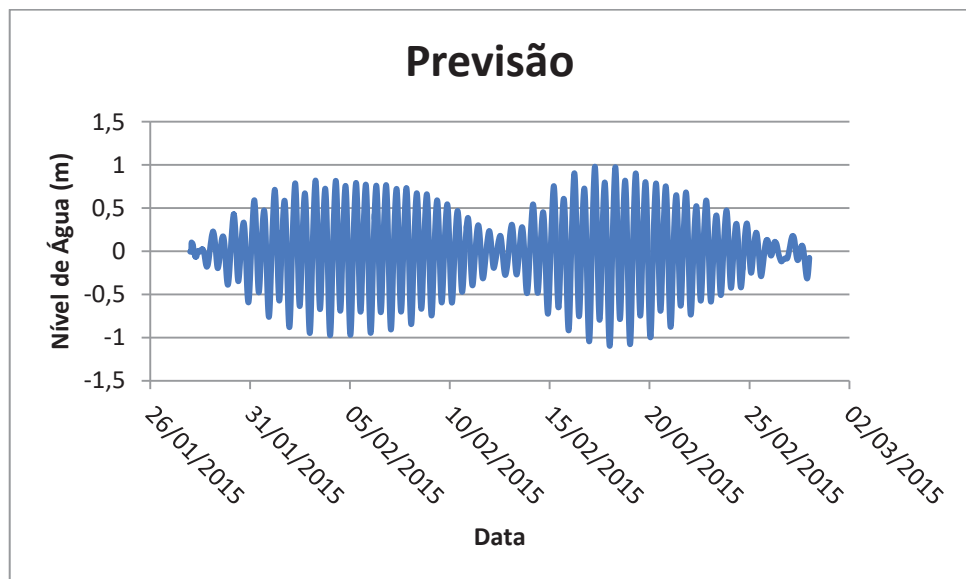


FIGURA 48. Previsão do nível de maré para Paranaguá para o período de 28/01/2015 a 28/02/2015.

Para análise dos erros gerados durante a modelagem (Fig. 49), os dados preditos foram subtraídos dos dados gerados pelo Delft3D restando apenas valores correspondentes aos erros produzidos durante o cálculo da maré. Observa-se que os valores são mínimos, oscilando entre -0,01 m e 0,02 m. Demonstrando que a maré gerada pelo modelo hidrodinâmico Delft3D apresenta poucos erros embutidos (Fig. 50) tornando viável a utilização da mesma para as simulações da hidrodinâmica do CEP.

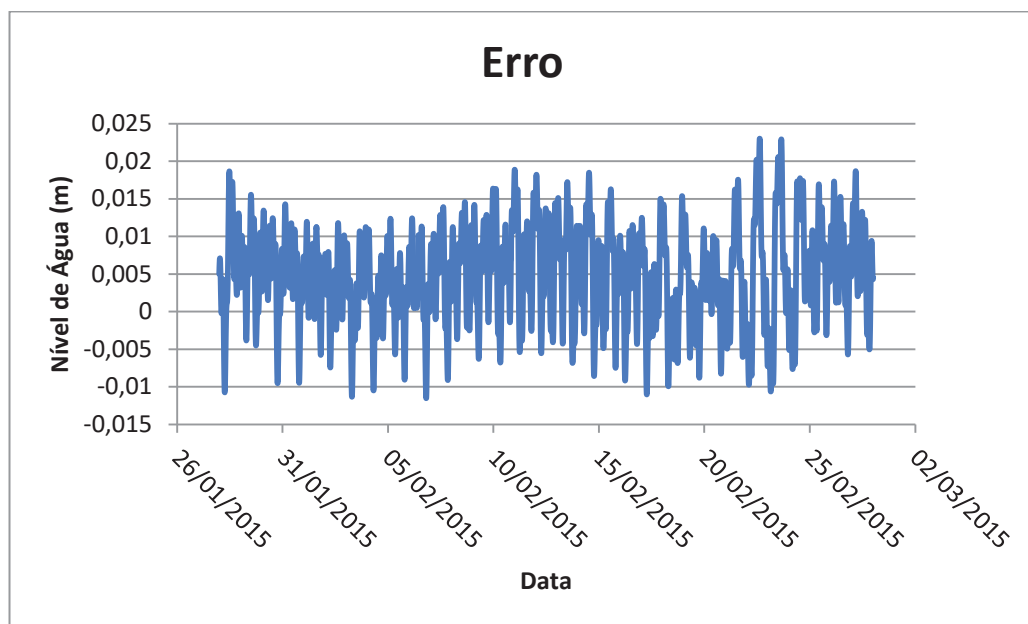


FIGURA 49. Erro presente nas variações de nível da maré para o período de 23/07/1996 a 22/08/1996.

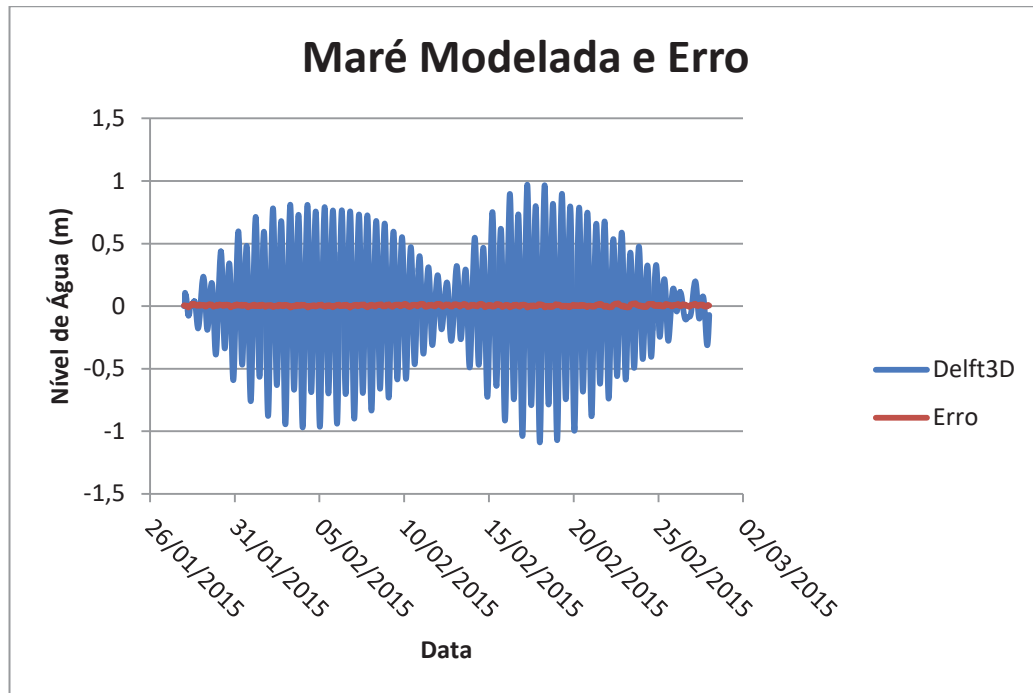


FIGURA 50. Nível de maré modelada para Paranaguá e erro embutido nas simulações.

6.2 Testes Delft3D

Ainda para avaliar a influência do vento na hidrodinâmica do estuário foram realizados dois testes com o modelo Delft3D utilizando como forçantes a maré simulada e duas direções de vento durante 30 dias. O primeiro teste avaliou a ação de uma pista de vento nordeste (Fig. 51) com intensidade de 10m/s, no segundo teste foi inserido como forçante uma pista de vento sudeste (Fig. 52) também com intensidade de 10 m/s. Estes testes foram realizados com o objetivo de avaliar a sensibilidade do modelo com relação a ventos paralelos a costa e sua relação com o efeito de Coriolis. Após os resultados serem obtidos a maré simulada foi subtraída das saídas do modelo que foram forçadas com vento e maré, para então ser possível a análise somente da ação do vento na hidrodinâmica estuarina.

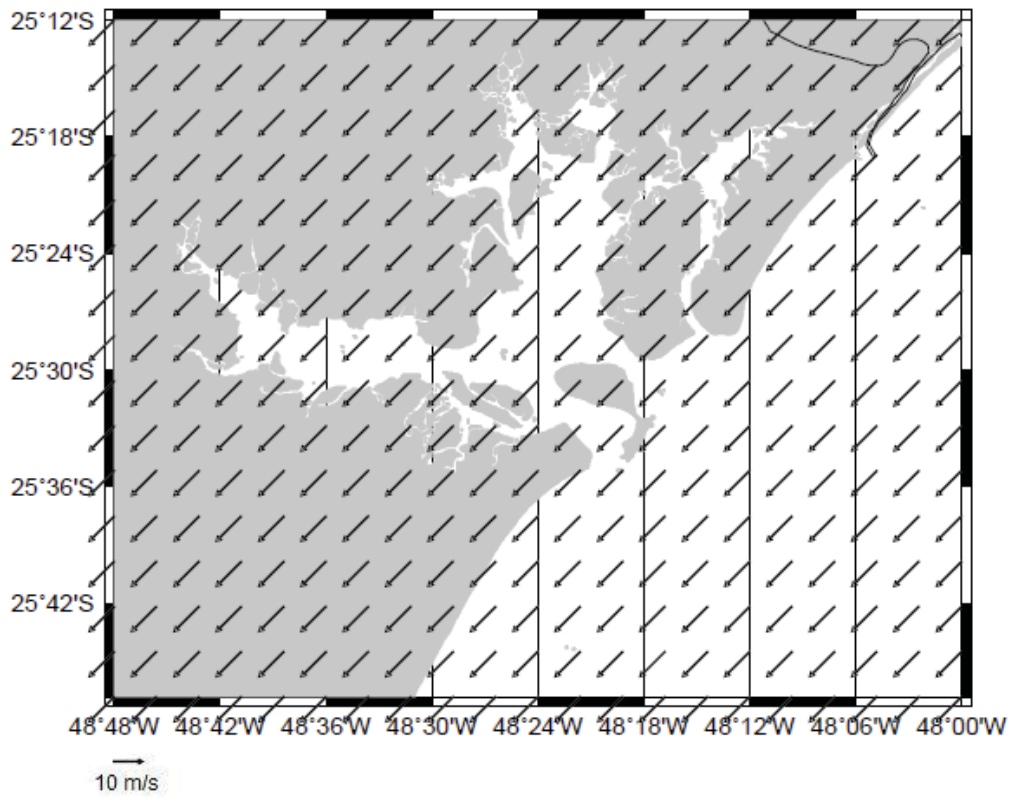


FIGURA 51. Campo de Vento Nordeste.

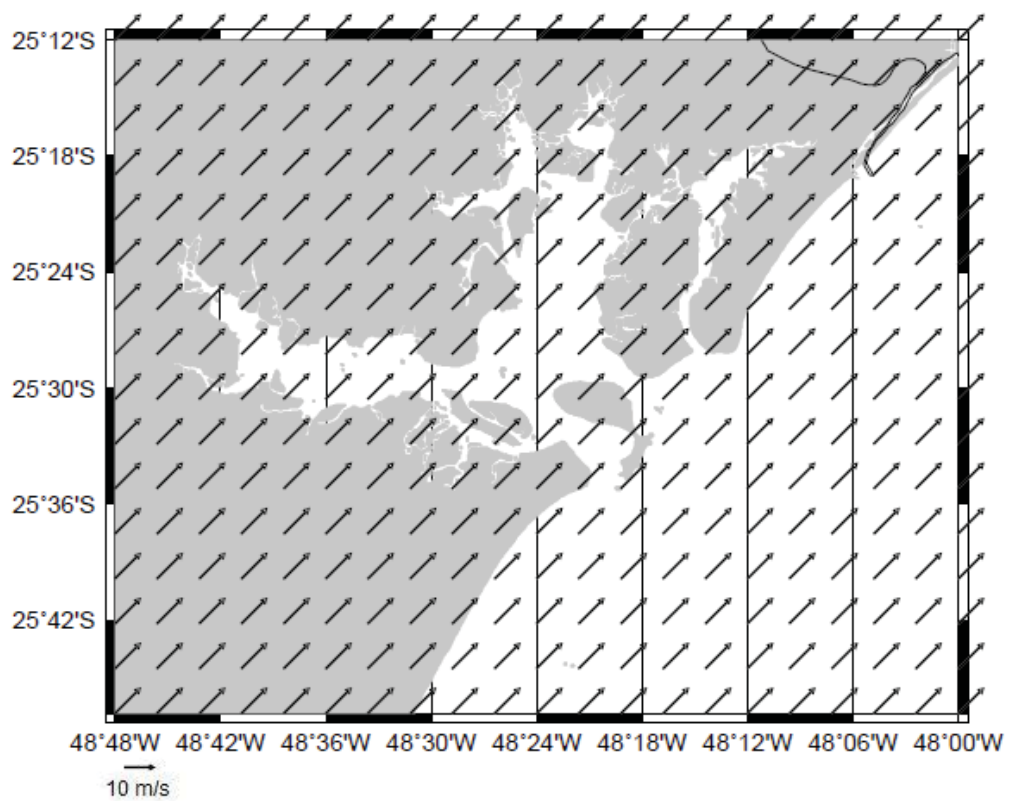


FIGURA 52. Campo de Vento Sudeste.

A corrente resultante gerada pelo vento Sudeste é apresentada na Figura 53. Observa-se fluxo predominante em direção Nordeste sobre a plataforma continental e fluxo enchente no domínio do estuário. Isso se deve pelo predomínio da ação do vento naquela região, ao passo a maré possui maior influência sobre as correntes no interior do estuário.

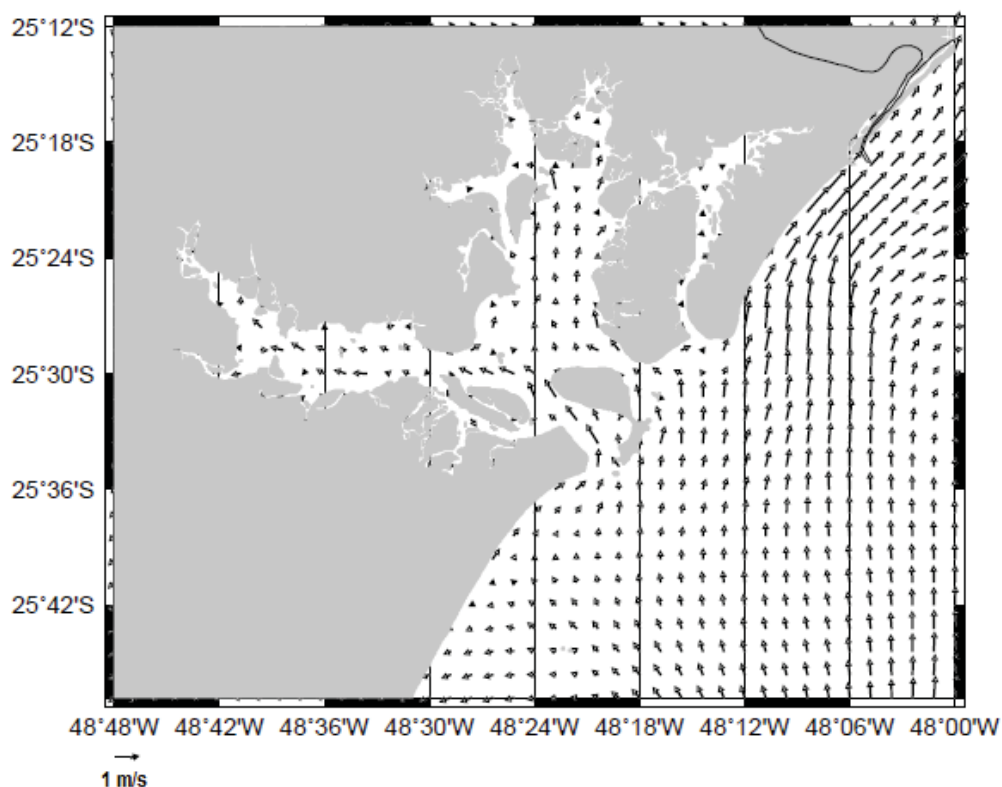


FIGURA 53. Campo de correntes vento sudeste.

As Figuras 54 e 55 demonstram o teste realizado com o vento nordeste e sudeste, respectivamente, ambos com intensidade de 10 m/s no período de 30 dias. Para o teste com o vento nordeste os níveis oscilaram entre -0,02 e 0,03 metros e apresentou o valor médio de -0,005. Para o teste com o vento sudeste os valores dos níveis de água variaram entre -0,02 m e 0,03 e o valor médio encontrado foi de 0,003.

Nas duas imagens é possível observar a influência da direção do vento nas variações dos níveis do mar. Quando a pista de vento é considerada com direção

nordeste (Fig. 54) nota-se que os valores médios são valores negativos, considerando o efeito de Coriolis para o hemisfério Sul, isto indica que ocorre saída de água do estuário. Quando o vento sudeste é considerado (Fig. 55) os valores médios apresentam valores positivos, indicando empilhamento de água dentro do CEP.

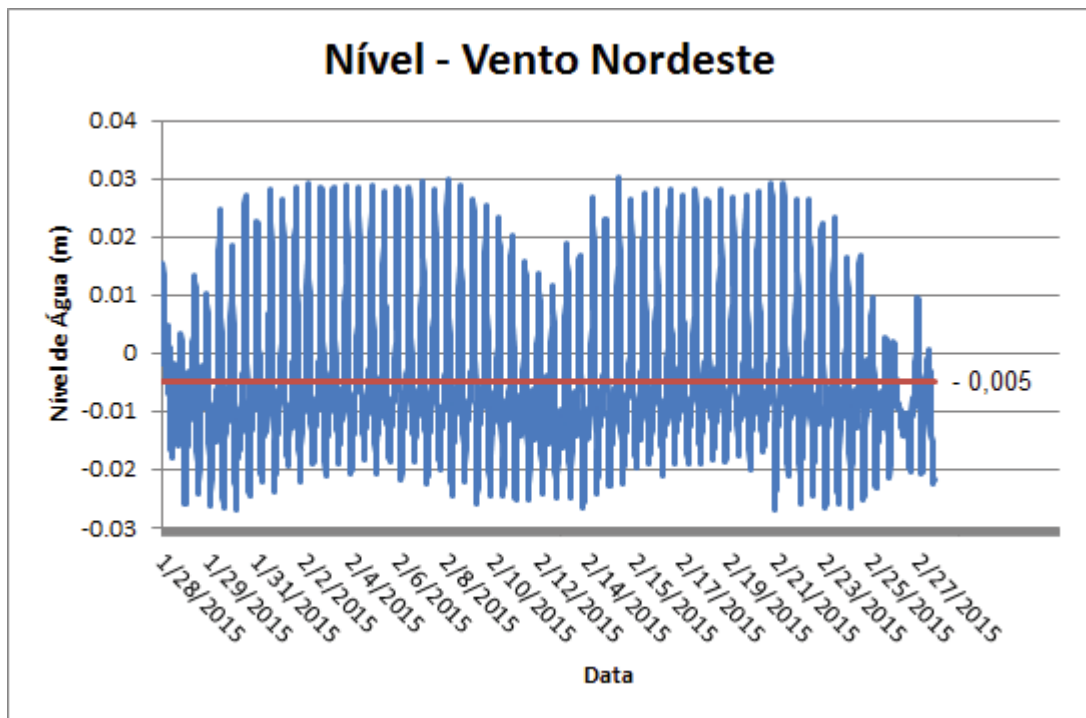


FIGURA 54. Influência do vento com direção nordeste e intensidade de 10 m/s durante 30 dias na hidrodinâmica do CEP.

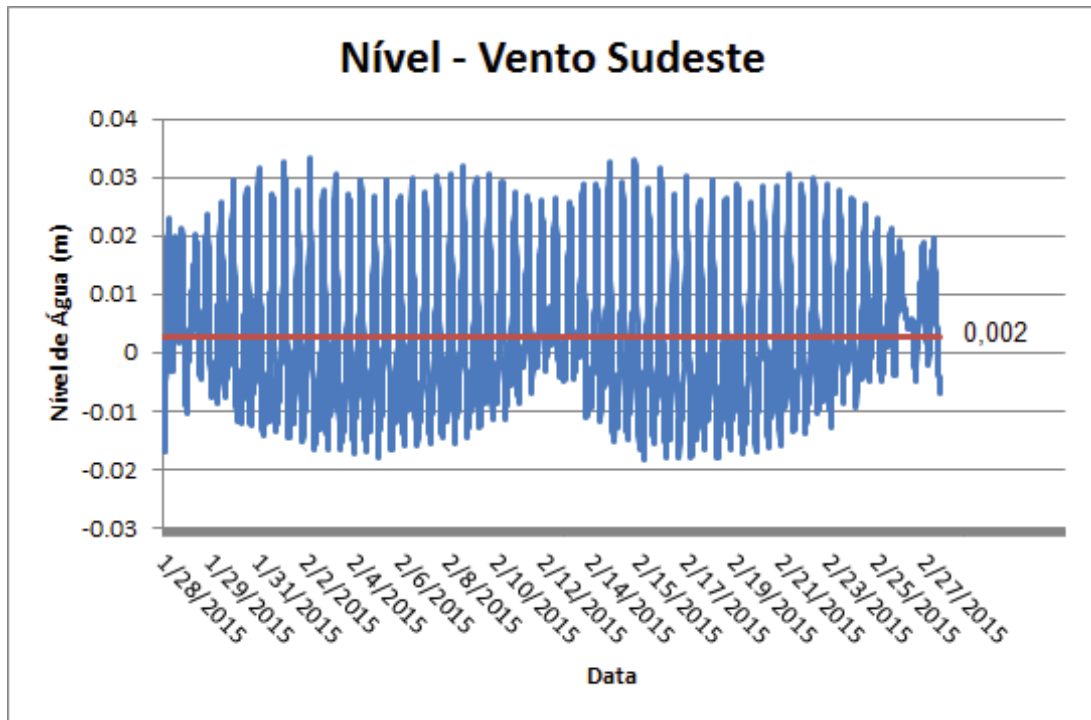


FIGURA 55. Influência do vento com direção sudeste e intensidade de 10 m/s durante 30 dias na hidrodinâmica do CEP.

7. RESULTADOS

7.1 RESULTADOS WRF

Para avaliar o desempenho do modelo atmosférico WRF, na reprodução dos sistemas frontais frios na região do CEP, foram utilizados dados de pressão atmosférica e velocidade do vento gerados pelo modelo em um ponto (48° 53' W, 25° 50' S) (Fig. 56) localizado a cerca de 4 km da estação meteorológica de Paranaguá (48° 52' W, 25° 53' S) e comparados com dados observados da estação meteorológica do SIMEPAR localizada em Paranaguá.



FIGURA 56. Imagem de satélite demonstrando o ponto de observação do modelo WRF em Paranaguá e a localização da estação meteorológica de Paranaguá.

7.1.1 Resultados WRF Cenário 1

O meteograma da pressão atmosférica gerado pelo modelo WRF e a série temporal da pressão da estação meteorológica de Paranaguá, ambos para o Cenário 1 (28/01/15 – 01/02/15), são apresentados na Figuras 57. Observa-se na Figura que o modelo foi capaz de representar a queda da pressão próxima ao dia 30

TABELA 9. Análises estatísticas entre a série de dados de pressão atmosférica simulados e observados para o Cenário 1.

	<i>Simulado – WRF</i>	<i>Observado</i>
Média	1011,88	1012,38
Desvio Padrão	3,24	4,52
Valor Máx.	1017,04	1018,80
Valor Mín.	1004,88	1005,10
EMA	0,4962	
EMR	0,0005	
R²	0,8203	

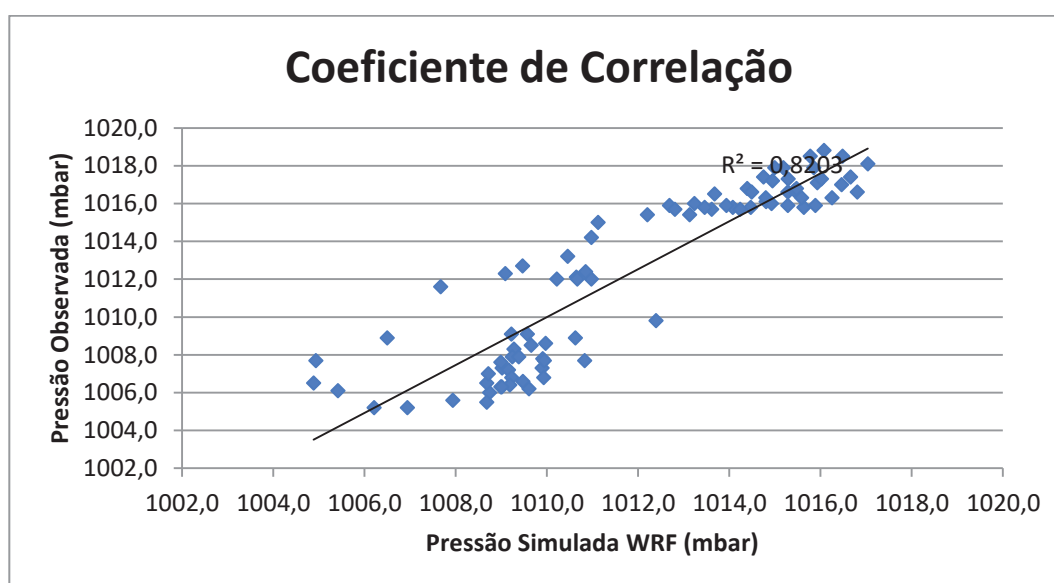


FIGURA 58. Coeficiente de Correlação Linear de Pearson entre as séries de dados de pressão atmosférica simuladas pelo WRF e os dados observados na estação meteorológica de Paranaguá – Cenário 1.

A Figura 59 apresenta o meteograma de velocidade do vento gerado pelo modelo atmosférico WRF para o Cenário 1 (28/01/15 – 01/02/15). E os dados de velocidade do vento medidos na estação meteorológica de Paranaguá, do mesmo período. Nota-se que o perfil de velocidade gerado pelo WRF reproduz o perfil dos dados observados na estação. O pico de velocidade ocorrido no dia 30 de janeiro, devido à entrada da frente na região, é também observado na série temporal gerada pelo modelo atmosférico.

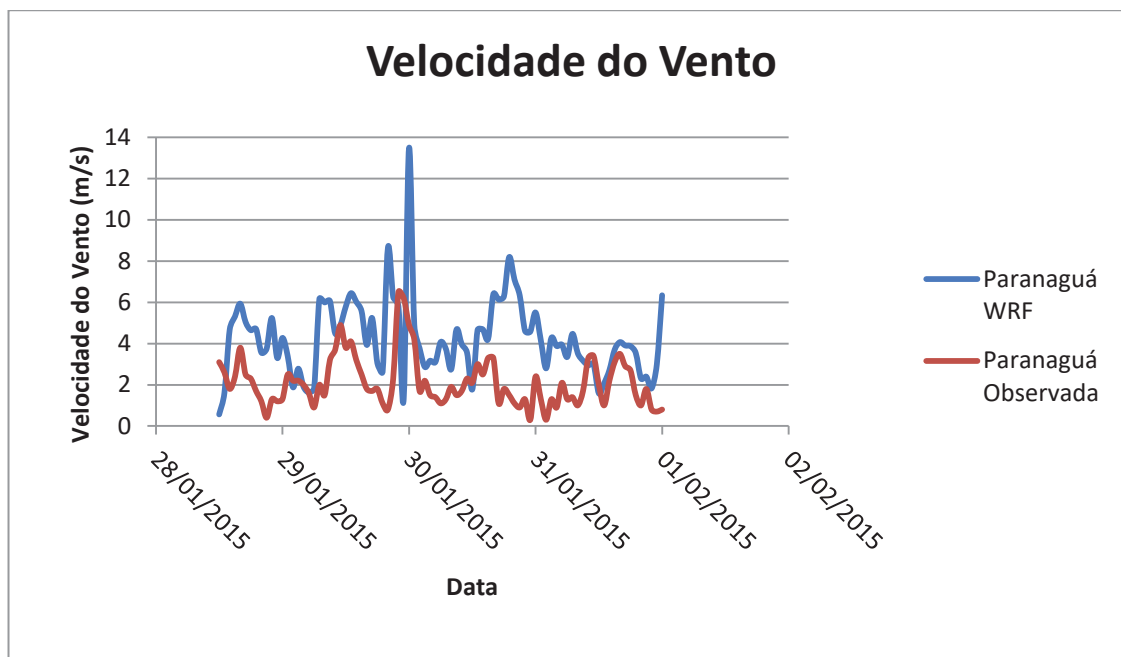


FIGURA 59. Velocidade do vento gerada pelo modelo WRF e observada na região de Paranaguá – Cenário 1.

Na tabela 10 são observadas as análises estatísticas entre as séries de dados de velocidade do vento simuladas e observadas para o Cenário 1.

TABELA 10. Análises estatísticas entre a série de dados de velocidade do vento simulados e observados para o Cenário 1.

	<i>Simulado - WRF</i>	<i>Observado</i>
Média	4,23	2,70
Desvio Padrão	1,90	1,34
Valor Máx.	13,48	9,70
Valor Mín.	0,56	0,30

As Figuras 60 a 65 demonstram os campos de vento gerados pelo modelo WRF no primeiro domínio da grade (resolução de 12,5 km). Na sequência de imagens é possível observar a entrada do sistema frontal frio no sul do Brasil no dia 29/01/2015 ao meio dia (Fig. 61) e nas horas seguintes o mesmo se desloca de sul para direção norte (Figs. 62, 63 e 64). Nota-se também a mudança de direção do vento com a entrada da frente. Antes da entrada o vento na região era

predominantemente norte/nordeste (Fig. 60) com a entrada do sistema frio a direção predominante passa a ser sul (Figs. 64 e 65).

Os campos de pressão e campos de vento gerados pelo WRF, no primeiro domínio da grade (resolução de 12,5 km), são apresentados nas Figuras 66 a 71. A entrada do sistema na região é também observada quando analisados os campos de pressão gerados pelo modelo (Fig. 67). A entrada da frente fria é acompanhada por um centro de baixa pressão que pode ser observado nas Figuras 68, 69 e 70. Os resultados demonstram que a direção do vento acompanha as isolinhas de pressão sendo que o núcleo do sistema frontal frio no período desloca-se na direção sul-norte.

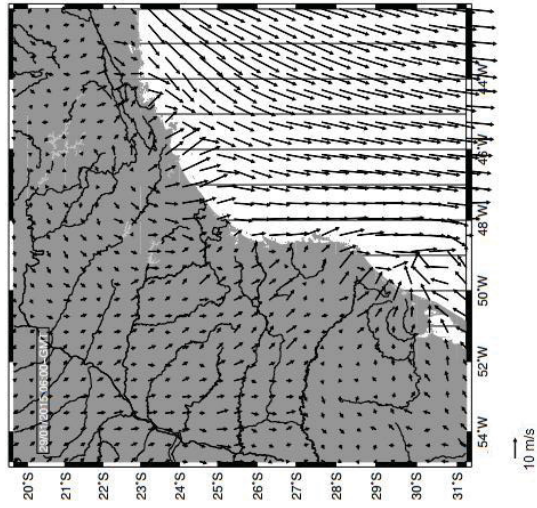


FIGURA 60. Campo de vento simulado
29/01/2015 06:00-GMT

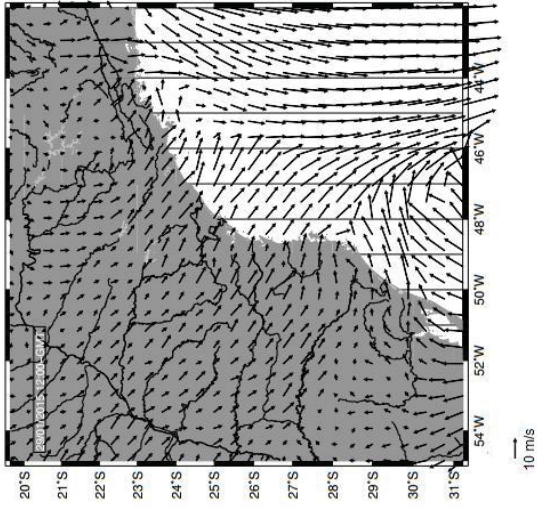


FIGURA 61. Campo de vento simulado
29/01/2015 12:00-GMT

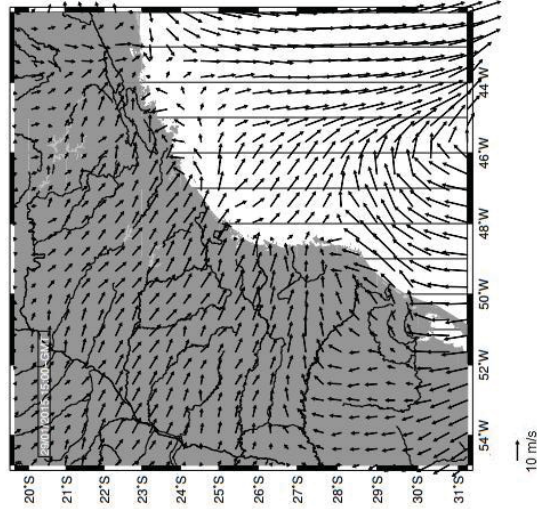


FIGURA 62. Campo de vento simulado
29/01/2015 15:00-GMT

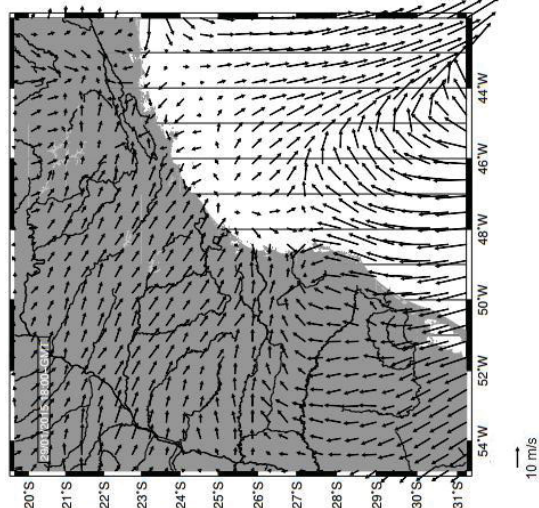


FIGURA 63. Campo de vento simulado
29/01/2015 18:00-GMT

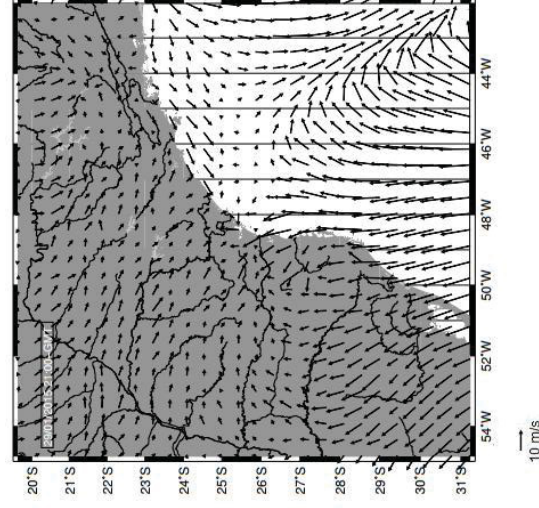


FIGURA 64. Campo de vento simulado
29/01/2015 21:00-GMT

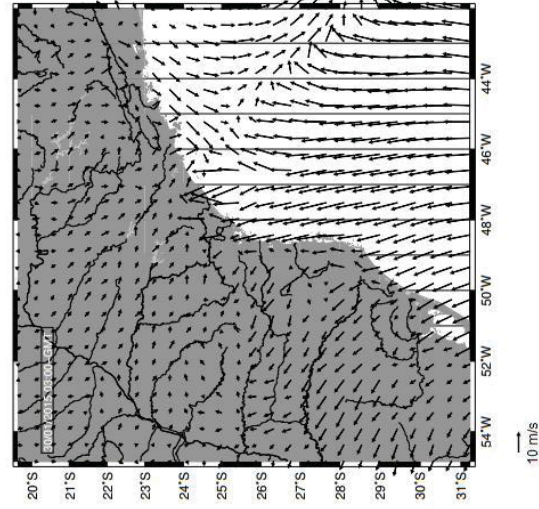


FIGURA 65. Campo de vento simulado
30/01/2015 03:00-GMT

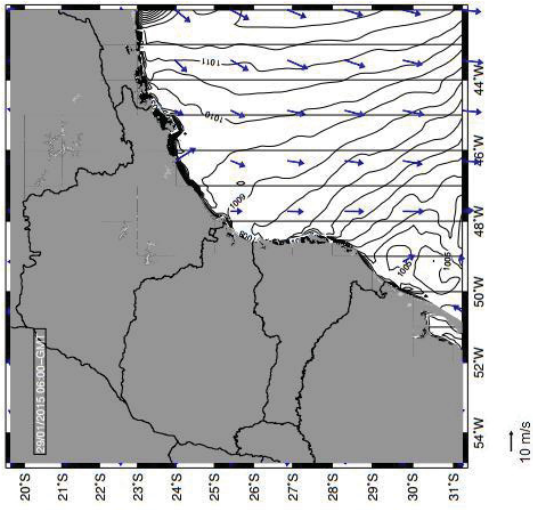


FIGURA 66. Campo de pressão simulado
29/01/2015 06:00-GMT

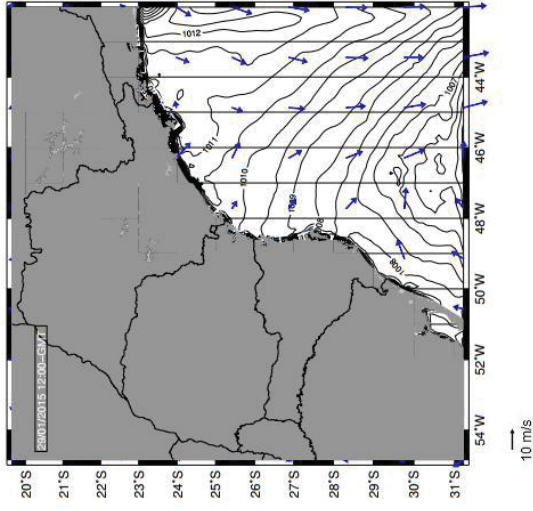


FIGURA 67. Campo de pressão simulado
29/01/2015 12:00-GMT

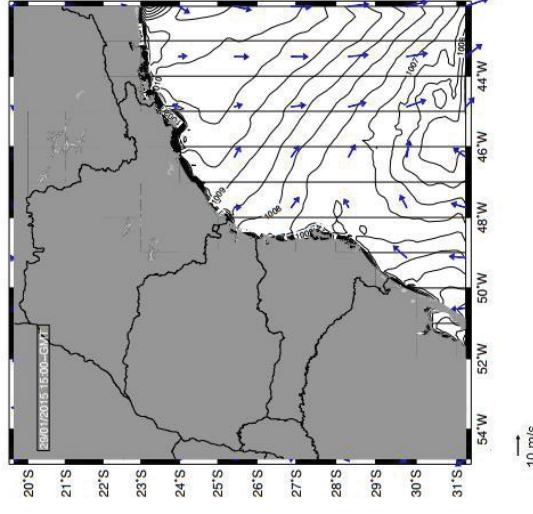


FIGURA 68. Campo de pressão simulado
29/01/2015 15:00-GMT

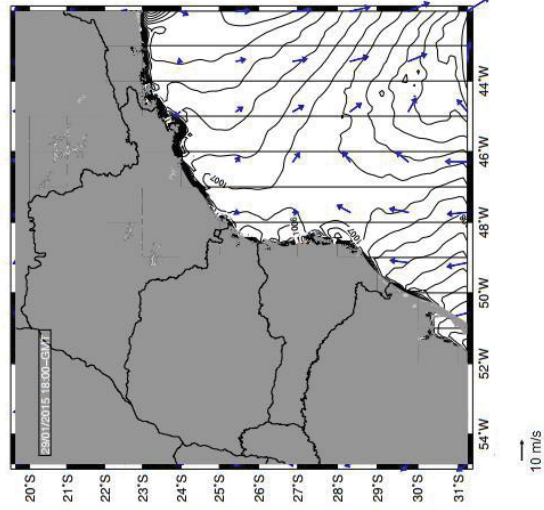


FIGURA 69. Campo de pressão simulado
29/01/2015 06:00-GMT

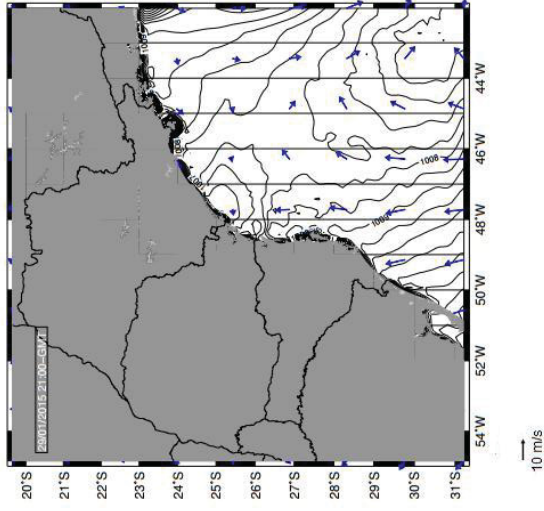


FIGURA 70. Campo de pressão simulado
29/01/2015 12:00-GMT

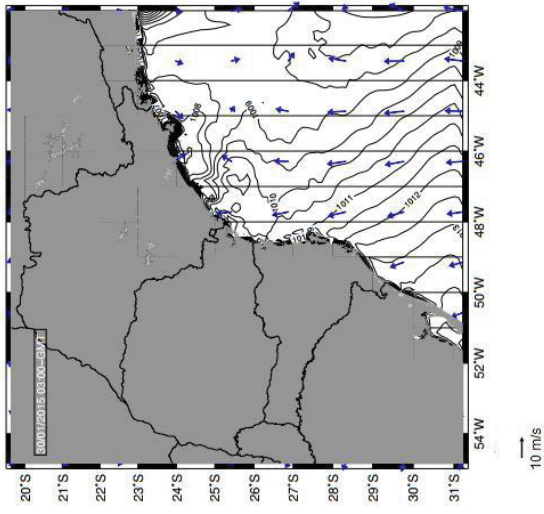


FIGURA 71. Campo de pressão simulado
29/01/2015 15:00-GMT

7.1.1 Resultados WRF Cenário 2

O meteograma da pressão atmosférica simulado pelo modelo WRF e a série temporal da pressão observada, ambos para o Cenário 2 (18/08/15 – 21/08/15), são apresentados na Figura 72. Observa-se que os dados gerados pelo modelo acompanham os dados observados, simulando a queda da pressão devido a entrada da frente fria no dia 19 de agosto. Nos dados de pressão atmosférica observados nota-se a entrada de dois sistemas frontais, nos dias 18 e 19 de agosto de 2015 (confirmados pelas cartas sinóticas), enquanto que nos dados simulados somente uma das frentes foi reproduzida.

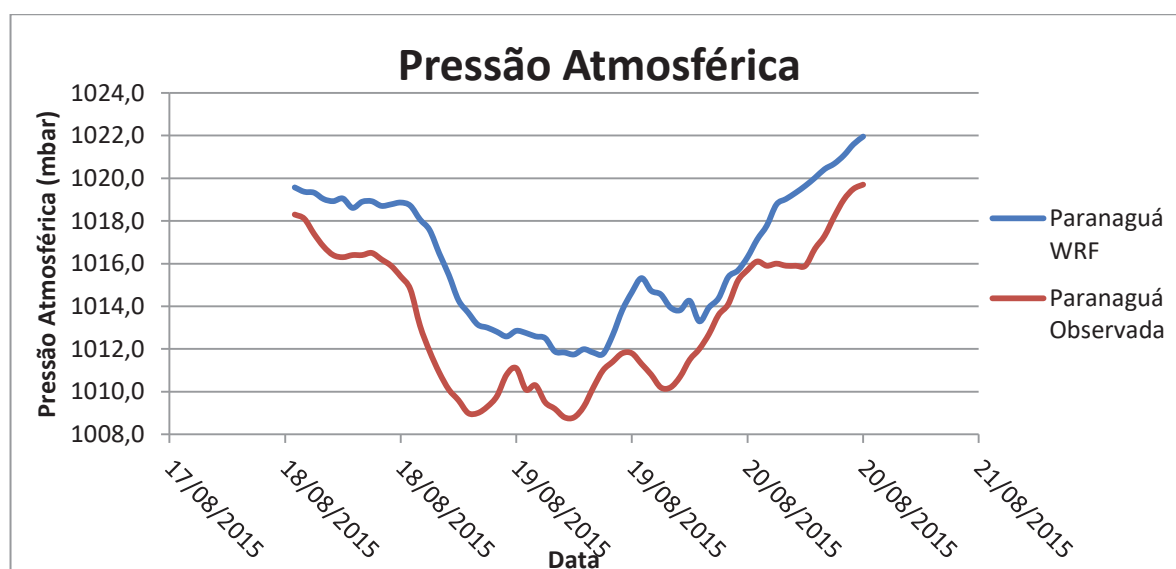


FIGURA 72. Pressão atmosférica gerada pelo modelo WRF e observada na região de Paranaguá – Cenário 2.

As análises estatísticas entre a série de dados de pressão atmosférica simulados e observados para o Cenário 2 são apresentadas na tabela 11. Observa-se que existe pouca diferença entre as médias, o desvio padrão e entre os valores máximos e mínimos. O erro médio absoluto e o erro médio relativo entre as duas séries foi de 2,7298 e 0,0027, respectivamente. O resultado do cálculo do coeficiente

de correlação linear de Pearson (Fig. 73) foi de 0,8662, demonstrando que os dados simulados e observados possuem alta correlação.

TABELA 11 Análises estatísticas entre a série de dados de pressão atmosférica simulados e observados para o Cenário 2.

	<i>Simulado - WRF</i>	<i>Observado</i>
Média	1016,26	1013,53
Desvio Padrão	3,15	3,31
Valor Máx.	1022,15	1019,80
Valor Mín.	1011,75	1008,60
EMA	2,7298	
EMR	0,0027	
R²	0,8662	

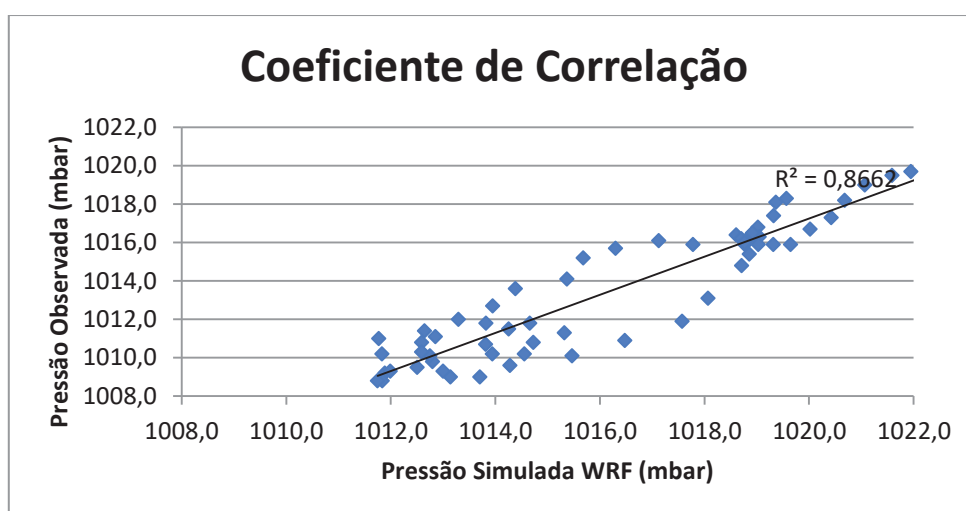


FIGURA 73. Coeficiente de Correlação Linear de Pearson entre as séries de dados de pressão atmosférica simuladas pelo WRF e os dados observados na estação meteorológica de Paranaguá – Cenário 2.

Na Figura 74 são apresentadas as velocidades do vento para a região de Paranaguá simuladas e observadas. Apesar de simular outros picos de velocidade a maior velocidade reproduzida pelo WRF, de 6,15 m/s (Tabela 12), corresponde ao dia da entrada do sistema frontal na região, fato confirmado pelos dados observados.

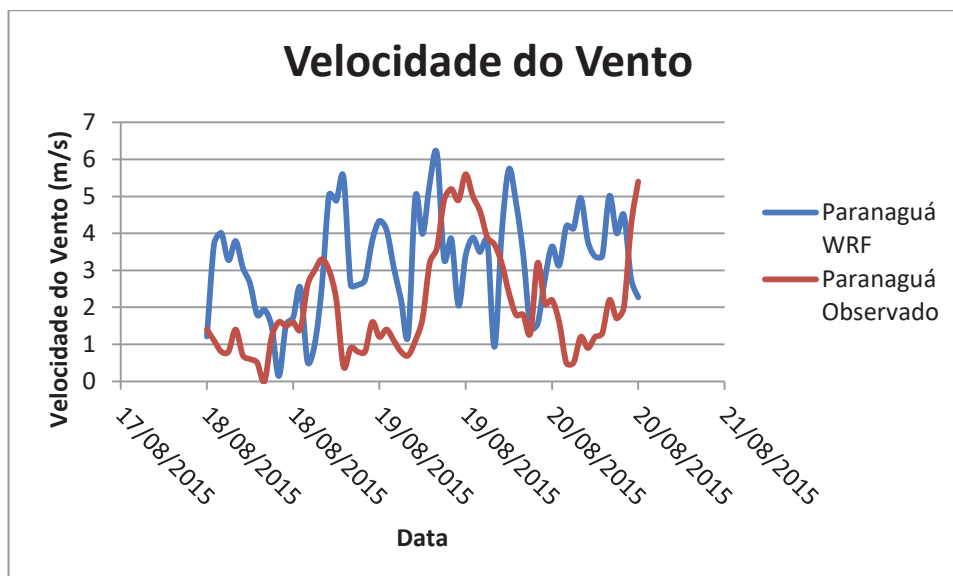


FIGURA 74. Velocidade do vento gerada pelo modelo WRF e observada na região de Paranaguá – Cenário 2.

TABELA 12. Análises estatísticas entre a série de dados de velocidade do vento simulados e observados para o Cenário 2.

	<i>Simulada – WRF</i>	<i>Observada</i>
Média	3,23	1,98
Desvio Padrão	1,37	1,36
Valor Máx.	6,15	5,60
Valor Mín.	0,00	0,00

Os campos de velocidade simulados, para o Cenário 2, pelo modelo atmosférico WRF no primeiro domínio da grade (resolução de 12,5 km) são apresentados nas Figuras 75 a 83. A condição da atmosfera com relação ao vento antes da chegada da frente na região é demonstrado na Figura 75, nota-se que a velocidade predominante do vento no dia 18 de agosto as 18 horas (GMT) era norte. Com a entrada da frente fria (Fig. 76) no dia 19/08 as 06 horas (GMT) já é possível observar mudanças nos padrões do vento. Com o avanço do sistema frontal a direção predominante do vento muda para sul (Figs. 76 a 81), permanecendo com esta direção por algumas horas após a saída do sistema frontal (Figs. 82 e 83).

Os campos de pressão e os campos de vento gerados pelo WRF, no primeiro domínio da grade (resolução de 12,5 km), são apresentados nas Figuras 84 a 92. A

entrada do sistema na região é também observada quando analisados os campos de pressão gerados pelo modelo (Fig. 86). A entrada da frente fria é acompanhada de um centro de baixa pressão que pode ser observado nas Figuras 87 a 91. A análise das imagens demonstra que a direção do vento acompanha as isóbaras sendo que o núcleo do sistema frontal no período desloca-se de direção sul para norte.

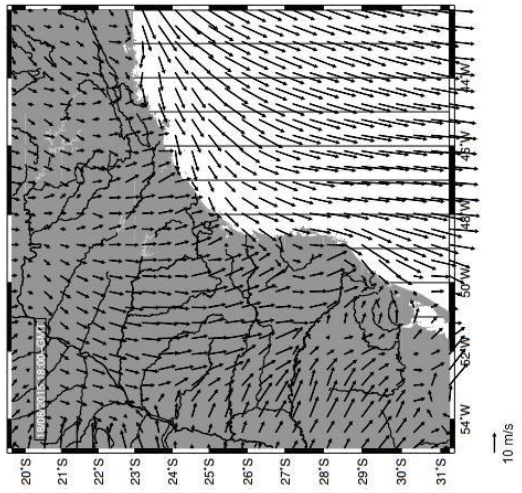


FIGURA 75. Campo de vento simulado
18/08/2015 18:00-GMT

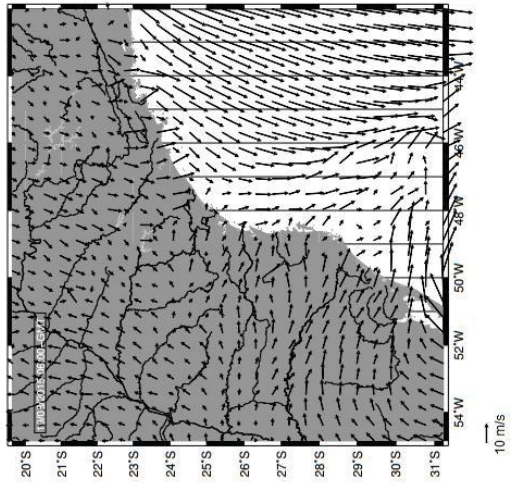


FIGURA 76. Campo de vento simulado
19/08/2015 06:00-GMT

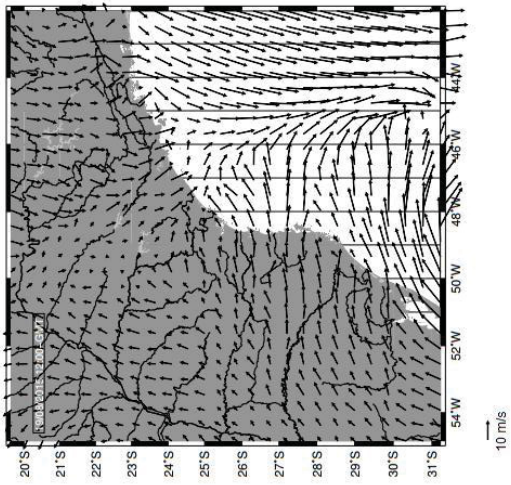


FIGURA 77. Campo de vento simulado
19/08/2015 12:00-GMT

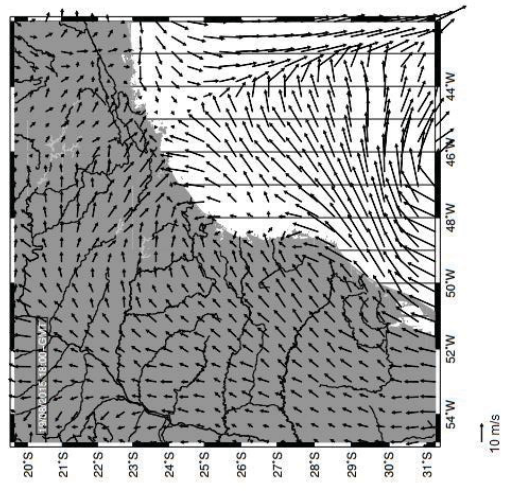


FIGURA 78. Campo de vento simulado
19/08/2015 18:00-GMT

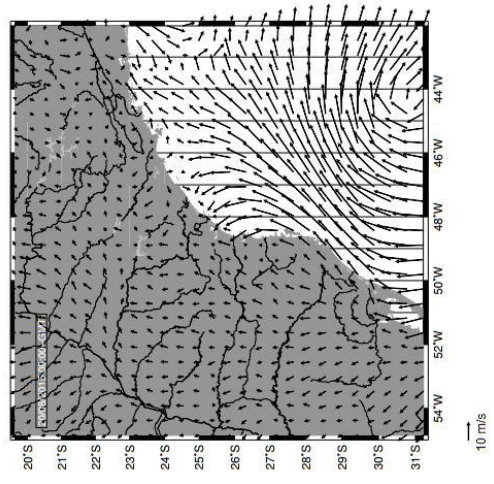


FIGURA 79. Campo de vento simulado
20/08/2015 00:00-GMT

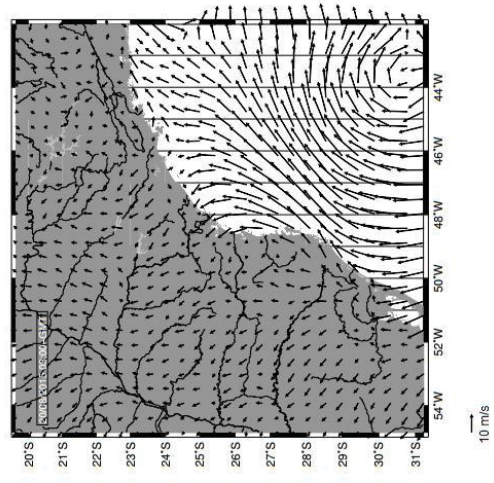


FIGURA 80. Campo de vento simulado
20/08/2015 03:00-GMT

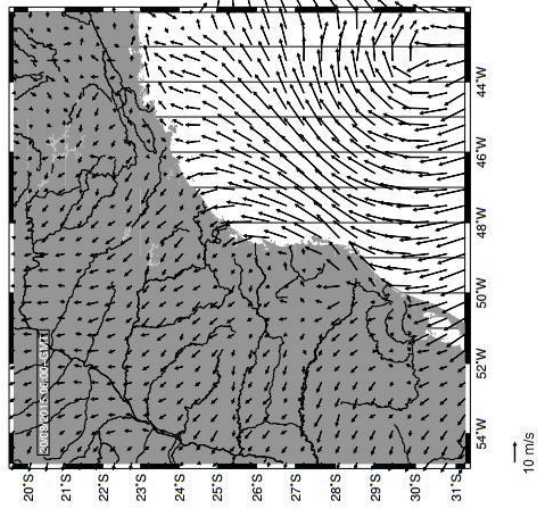


FIGURA 81. Campo de vento simulado
20/08/2015 06:00-GMT

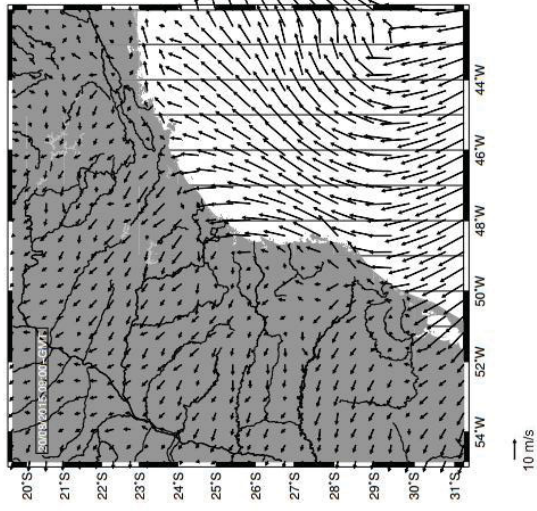


FIGURA 82. Campo de vento simulado
20/08/2015 09:00-GMT

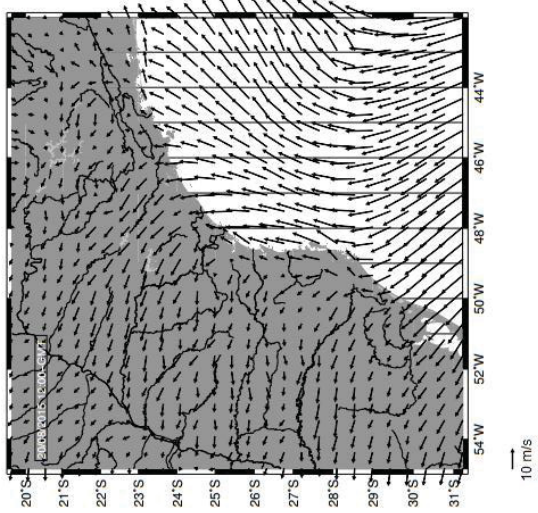


FIGURA 83. Campo de vento simulado
20/08/2015 12:00-GMT

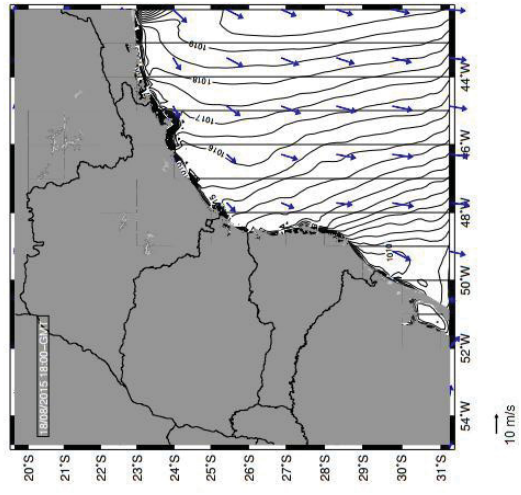


FIGURA 84. Campo de pressão simulado
18/08/2015 18:00-GMT

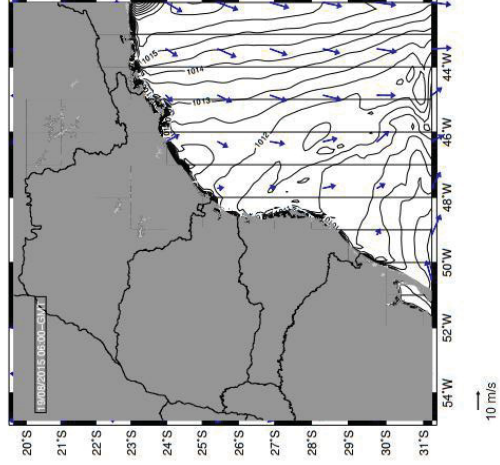


FIGURA 85. Campo de pressão simulado
19/08/2015 06:00-GMT

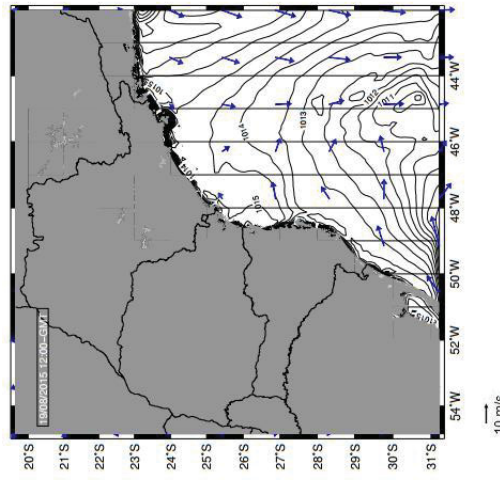


FIGURA 86. Campo de pressão simulado
19/08/2015 12:00-GMT

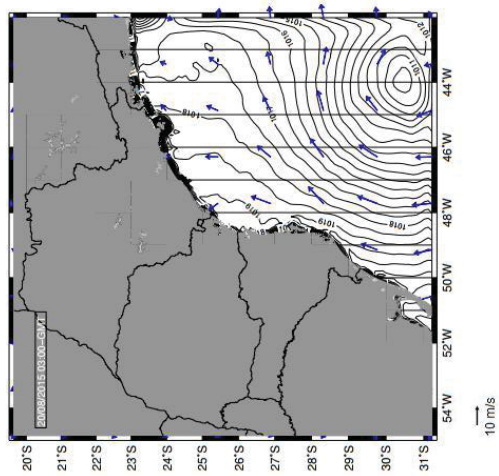


FIGURA 89. Campo de pressão simulado
20/08/2015 03:00-GMT

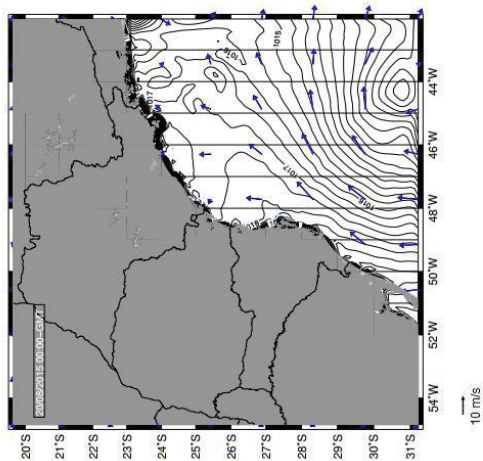


FIGURA 88. Campo de pressão simulado
20/08/2015 00:00-GMT

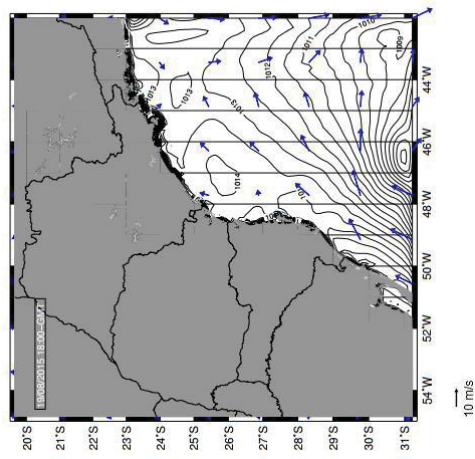


FIGURA 87. Campo de pressão simulado
19/08/2015 18:00-GMT

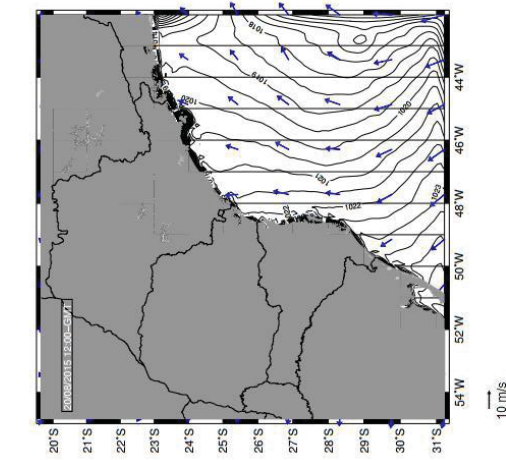


FIGURA 92. Campo de pressão simulado
20/08/2015 12:00-GMT

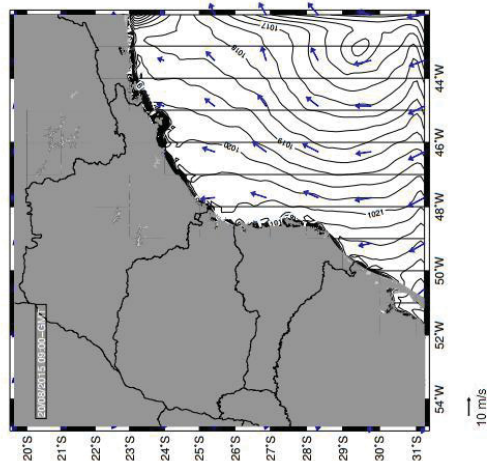


FIGURA 91. Campo de pressão simulado
20/08/2015 09:00-GMT

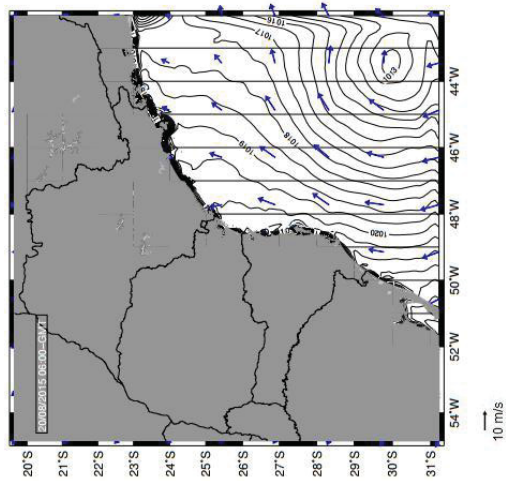


FIGURA 90. Campo de pressão simulado
20/08/2015 06:00-GMT

7.2 RESULTADOS DELFT3D

Para avaliar a resposta da hidrodinâmica do Complexo Estuarino de Paranaguá quando ocorre a passagem de sistemas frontais frios na região, foram realizadas simulações com o modelo Delft3D utilizando os dados de velocidades e direção do vento, gerados pelo WRF, como forçantes. Os campos de vento gerados pelo modelo WRF apresentaram pouca variabilidade espacial na região de maior interesse. Baseado nessa característica do sistema optou-se por utilizar apenas as informações de velocidade e direção do vento extraídas em um ponto representativo de todo o domínio. A Figura 93 apresenta a localização do ponto escolhido “Ponto WRF Oceano”, e a localização da estação meteorológica utilizada.

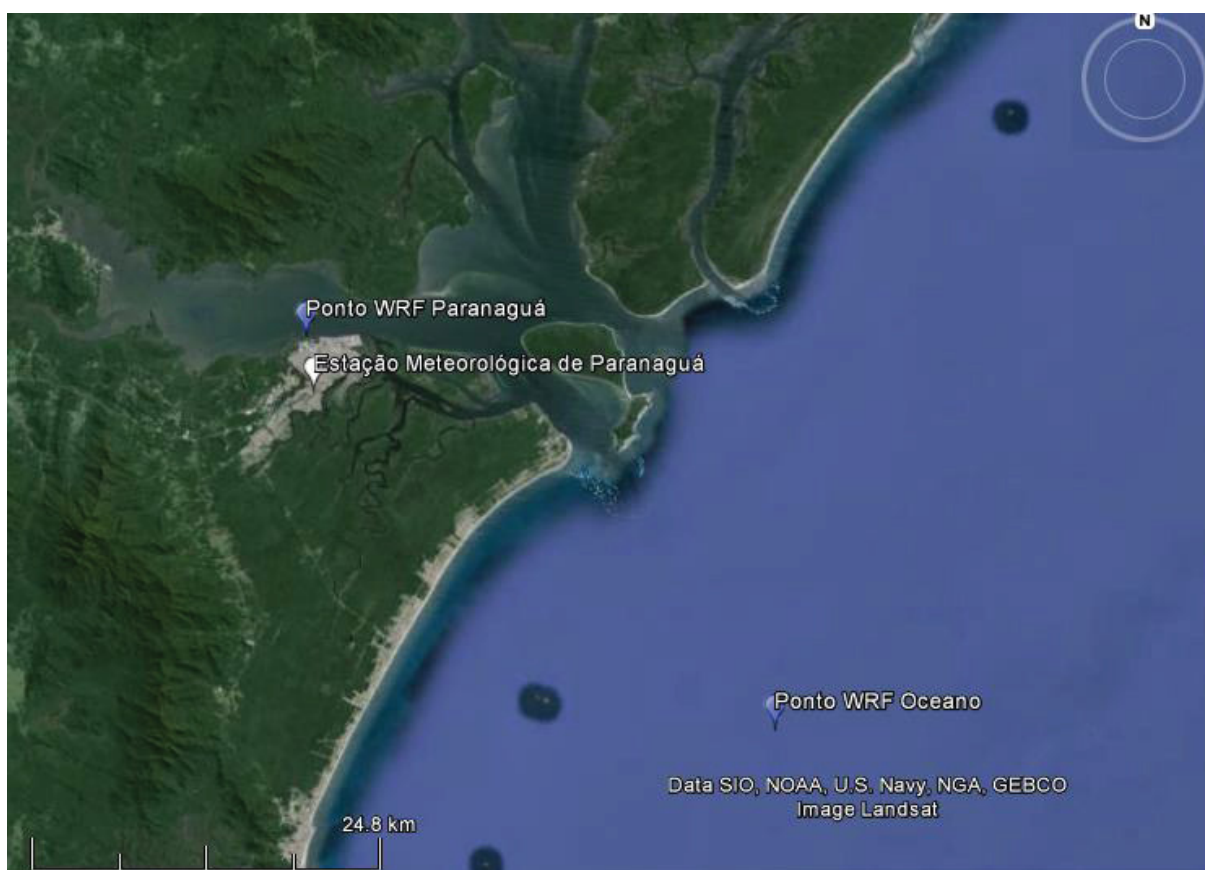


FIGURA 93. Localização do ponto de grade escolhido para utilizar os dados de velocidade e direção do vento simulados pelo WRF como forçantes do Delft3D.

Os campos de vento gerados pelas simulações dos dois cenários escolhidos foram utilizados como forçantes nas simulações realizadas com o modelo hidrodinâmico.

7.2.1 Resultados Delft3D Cenário 1

As componente U e V do campo de corrente hidrodinâmica simulada para o ponto localizado em Paranaguá para o primeiro cenário são apresentadas nas Figuras 94 e 95, respectivamente. Para o período a componente U variou entre -0,02185 e 0,01987 m/s sendo o valor médio da série igual a -0,00375 m/s. Para a componente V da velocidade os valores variaram entre -0,027 e 0,0357 m/s, apresentando o valor médio de 0,0104 m/s.

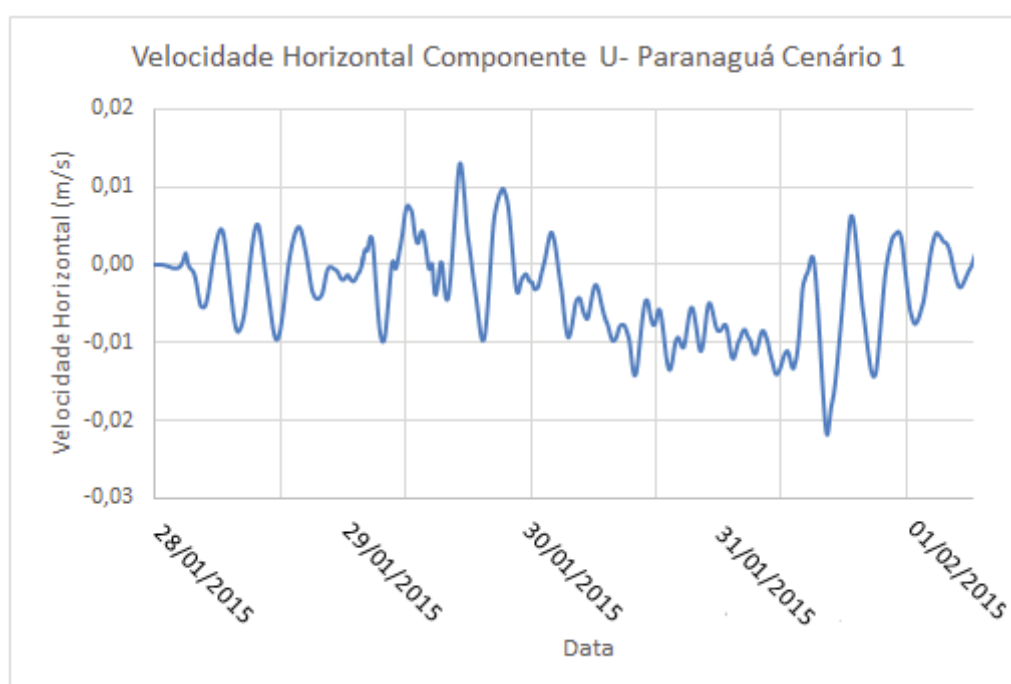


FIGURA 94. Velocidade Horizontal da Componente U simulada para o Cenário 1.

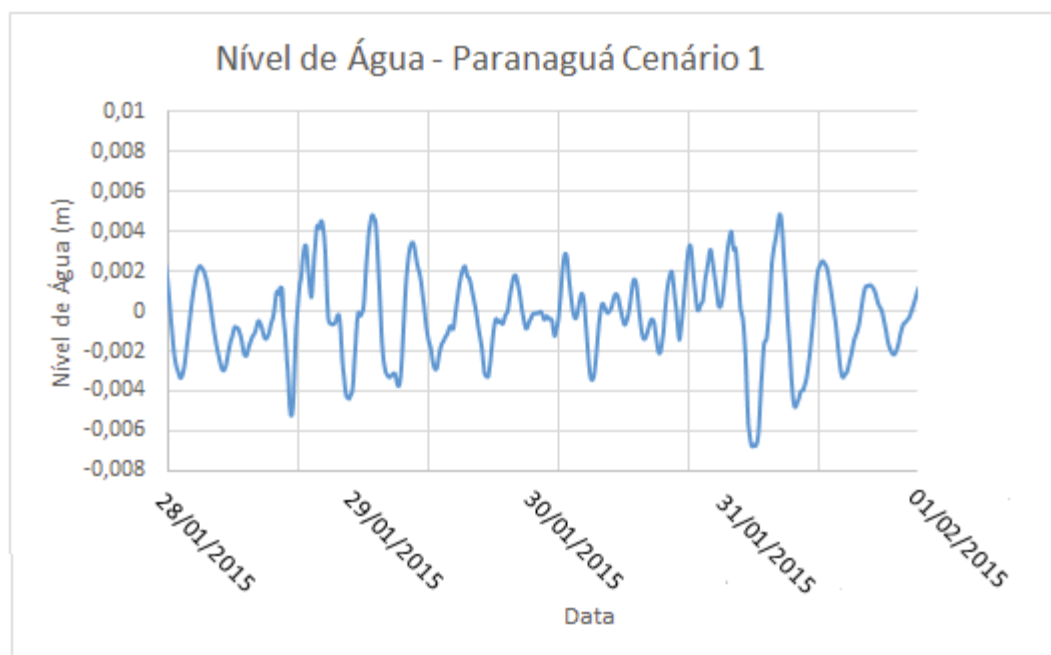


FIGURA 96. Nível de água simulado para região de Paranaguá - Cenário 1.

Na Figura 97 observa-se o campo de correntes simulado para o dia 29 de janeiro as 21:00 horas, antes da entrada do sistema frontal no estuário. Para este período, nota-se que a velocidade das correntes sobre a plataforma é da ordem de 0,1 m/s, as correntes na região costeira fluem predominantemente para norte, sendo possível observar também fluxo em direção ao estuário.

O campo de correntes após a entrada do sistema frontal é apresentado na Figura 98 (30/01/2015 21:00 horas – GMT). Nesse instante observa-se que há intensificação das correntes, atingindo valores da ordem de 0,2 m/s nas regiões localizadas próxima a desembocadura do estuário. As correntes costeiras e estuarinas acompanham a direção da frente, fluindo para direção norte.

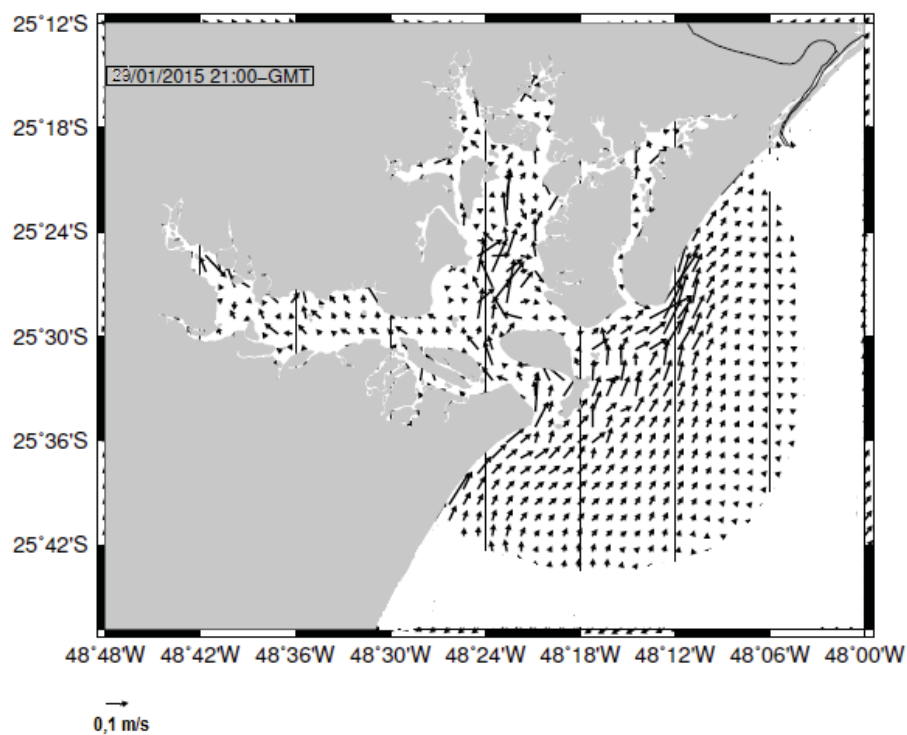


FIGURA 97. Campo de Corrente simulado para o dia 29/01/2015 - 21:00 horas (GMT) – antes da entrada da frente fria.

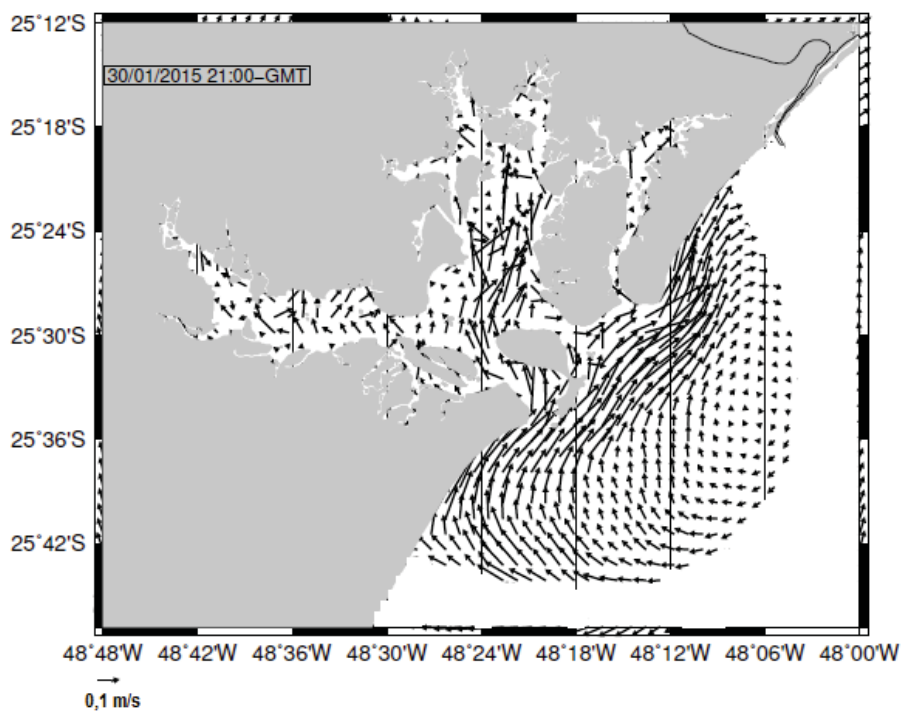


FIGURA 98. Campo de Corrente simulado para o dia 30/01/2015 - 21:00 horas (GMT) – após a entrada da frente fria.

7.2.2 Resultados Delft3D Cenário 2

As componente U e V da corrente simulada em Paranaguá para o Cenário 2 são apresentadas nas Figuras 99 e 100, respectivamente. Para o período a componente U variou entre -0,0093 e 0,0178 m/s sendo o valor médio da série igual a 0,0002 m/s. Para a componente V da velocidade os valores variaram entre -0,0364 e 0,0255 m/s, apresentando o valor médio de 0,0021 m/s. Após a entrada do sistema frontal no dia 19 de agosto ocorre uma maior variação nos valores da componente U. Enquanto que a componente V não apresenta alterações associada com a entrada da frente.

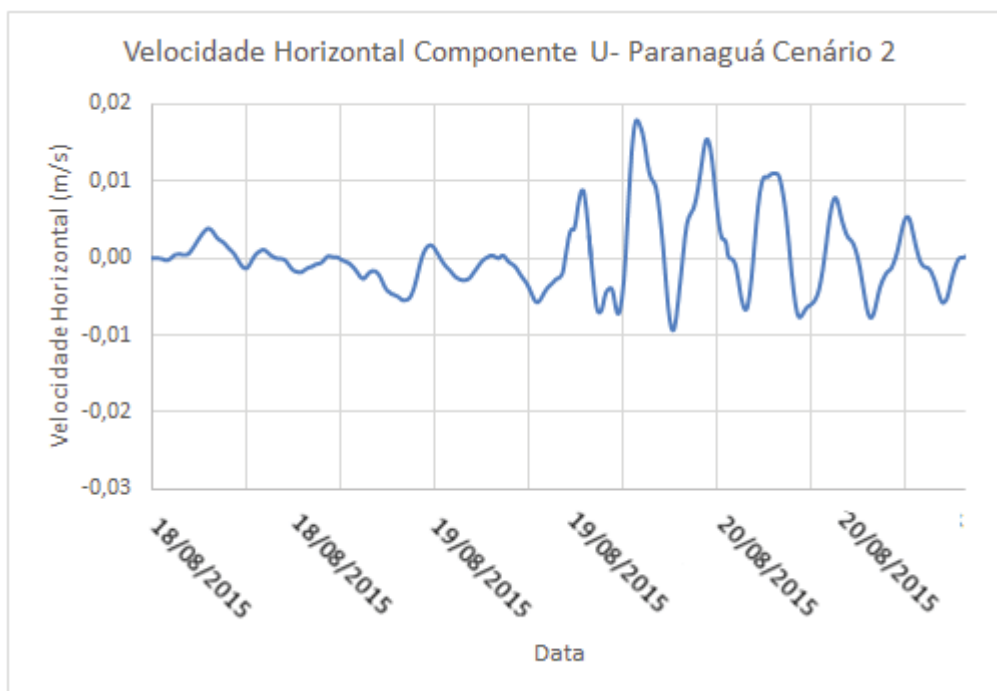


FIGURA 99. Velocidade Horizontal da Componente U simulada para o Cenário 2.

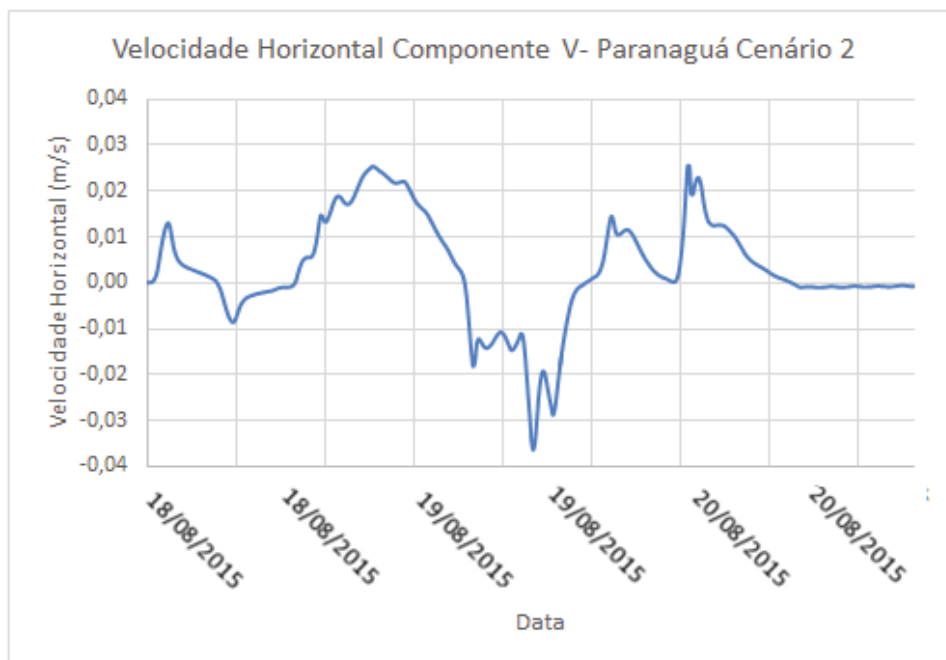


FIGURA 100. Velocidade Horizontal da Componente V observada para o Cenário 2.

A Figura 101 apresenta o nível de água simulado para o Cenário 2 na região de Paranaguá. Com a entrada do sistema frontal no dia 19 de agosto nota-se que há uma maior oscilação entre os valores negativos e positivos, variando entre -0,7 e 0,9 cm, enquanto que antes da entrada da frente os valores estavam em torno do nível médio, de 0,009 cm.

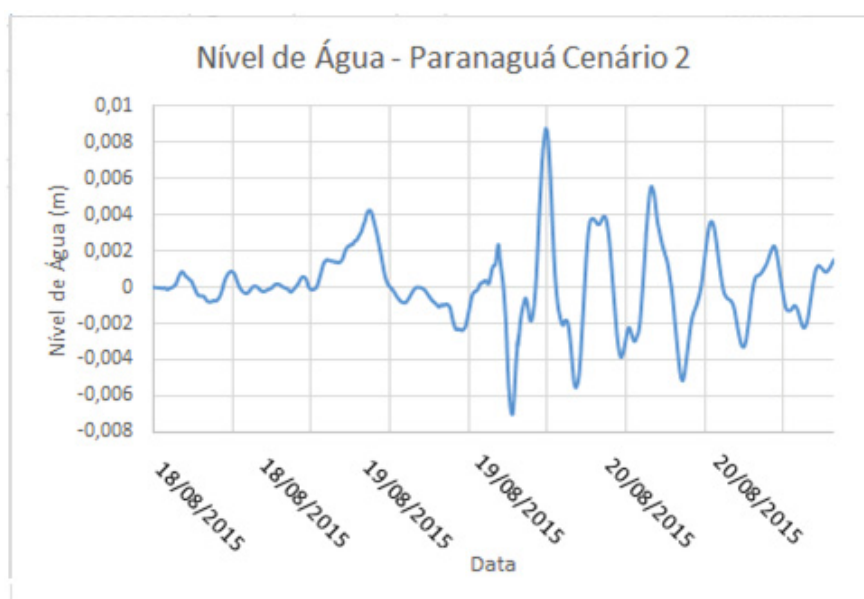


FIGURA 101. Nível de água simulado para região de Paranaguá - Cenário 2.

A Figura 102 apresenta o campo de correntes simulado para o dia 19 de agosto as 21:00 horas, representando o dia da entrada do sistema frontal no estuário. Durante este período a velocidade das correntes costeiras e estuarinas apresentam ordem de grandeza de 0,1 m/s, com direção ao interior do CEP.

O campo de correntes após a entrada do sistema frontal frio é apresentado na Figura 103 (20/08/2015 09:00 horas – GMT). Após a entrada da frente, não há alterações significativas na intensidade das correntes. Entretanto, é possível notar que as correntes costeiras e estuarinas fluem para norte seguindo a direção do sistema frontal.

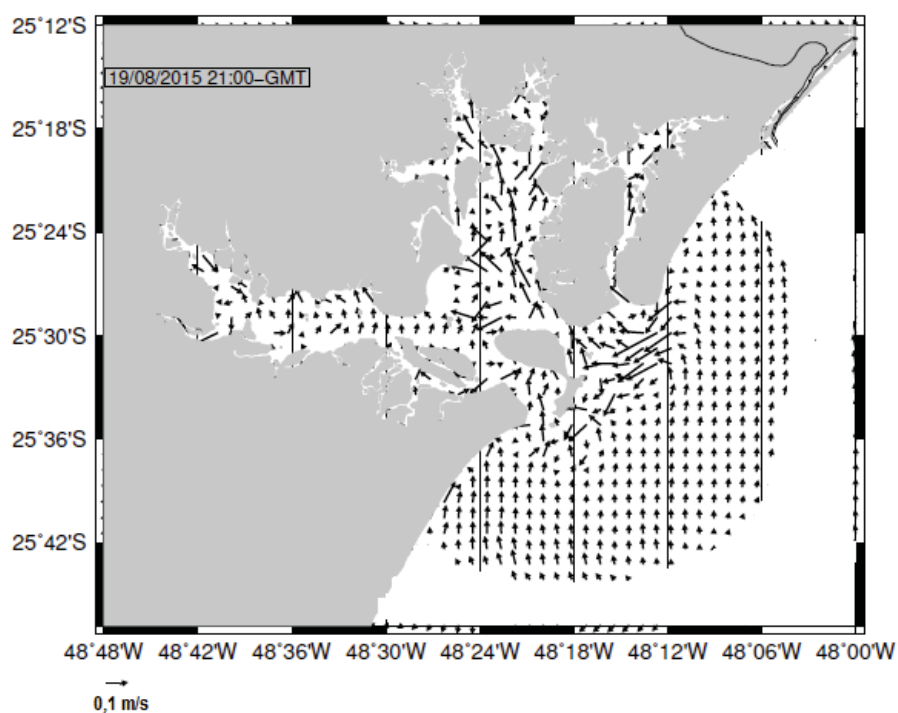


FIGURA 102. Campo de Corrente simulado para o dia 19/08/2015 21:00 horas (GMT) – no dia de entrada da frente fria.

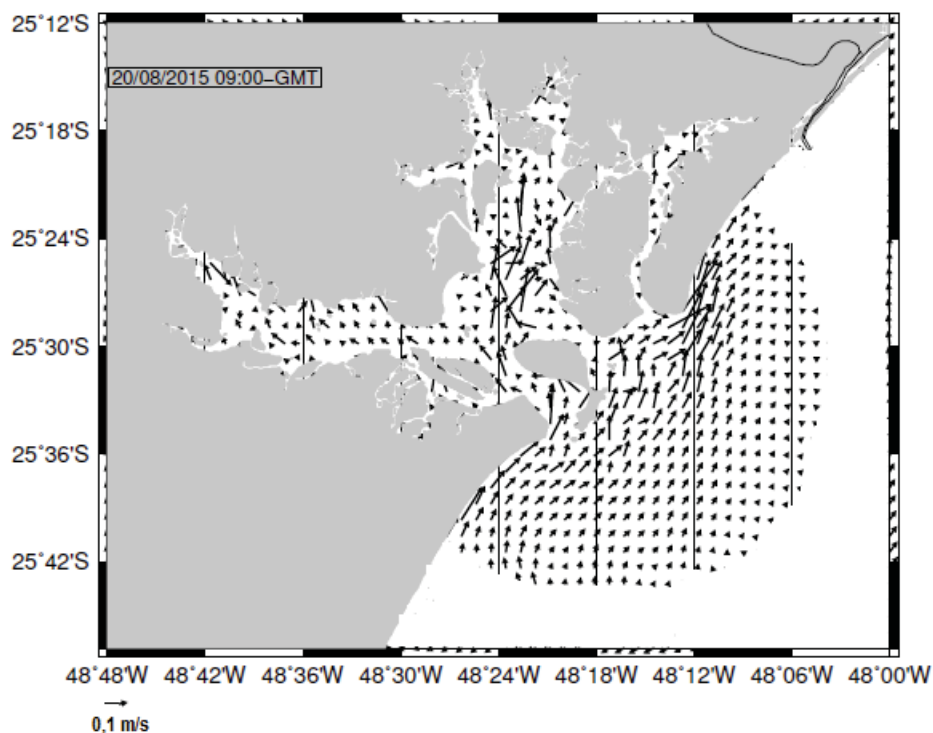


FIGURA 103. Campo de Corrente simulado para o dia 20/08/2015 09:00 horas (GMT) – após a passagem da frente fria.

7.2.3 Comparações entre os cenários.

A tabela 13 apresenta os valores máximos, mínimos, médios e o desvio padrão das componentes U e V da velocidade horizontal das correntes e do nível de água simulados pelo modelo Delft3D para o Cenário 1 (Verão) e para o Cenário 2 (Inverno).

Com relação a componente U da velocidade horizontal o Cenário 1 apresentou maior variação entres os valores máximo e mínimo quando comparado com o Cenário 2, obtendo um desvio padrão de 0,00616 para o verão e 0,00449 para inverno. Para a componente V nos dois cenários não foram observadas diferenças entre as variações, apresentando um desvio padrão de 0,01209 e 0,01001 para o Cenário 1 e 2, respectivamente.

O nível de água durante a passagem do sistema frontal o Cenário 1 apresentou menor variação quando comparado com o Cenário 2. Os valores máximo e mínimo para o verão foram de 0,4 cm e -0,6 cm, respectivamente e o

desvio padrão foi de 0,00218. Enquanto que para o inverno o valor máximo foi de 0,8 cm, o mínimo de -0,7 cm e o desvio padrão observado foi de 0,00225.

TABELA 13. Análises estatísticas dos Cenários 1 e 2.

	<i>Cenário 1</i>			<i>Cenário 2</i>		
	Vel. Horiz. U	Vel. Horiz. V	Nível de Água	Vel. Horiz. U	Vel. Horiz. V	Nível de Água
<i>Máxima</i>	0,01299	0,03575	0,00489	0,01782	0,02553	0,00877
<i>Mínima</i>	-0,02185	-0,02700	-0,00678	-0,00938	-0,03641	-0,00700
<i>Média</i>	-0,00375	0,01042	-0,00028	0,00018	0,00211	0,00010
<i>Desvio Padrão</i>	0,00616	0,01209	0,00218	0,00449	0,01001	0,00225

8. DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

O principal objetivo deste trabalho foi analisar a resposta da hidrodinâmica do Complexo Estuarino de Paranaguá devido a ação do vento oriundo da passagem de sistemas frontais frios na região. Para identificação das frentes foram utilizados dados de estações meteorológicas (pressão atmosférica e velocidade do vento) e cartas sinóticas da região.

Para a realização do presente estudo o modelo atmosférico Weather Research and Forecast Model (WRF) foi implementado para a região de interesse. Para avaliar o desempenho do modelo na reprodução dos sistemas frontais frios os campos de pressão e vento gerados pelo modelo foram comparados com dados observados da estação meteorológica de Paranaguá. Os meteogramas de pressão atmosférica de ambos os Cenários demonstram que o modelo foi capaz de representar a queda da pressão nos dias 30 de janeiro (Cenário 1) e 19 de agosto (Cenário 2), caracterizando a entrada do sistema frontal na região, o mesmo é observado nos dados obtidos da estação meteorológica.

Os resultados também demonstram que o modelo foi capaz de reproduzir com eficiência os campos de pressão do ar para a região, apresentando um Erro Médio Relativo (EMR) de apenas 0,0005 no Cenário 1 e 0,0027 para o Cenário 2. Comprovando a boa correlação entre os dados os resultados dos Coeficientes de Correlação Linear de Pearson (r^2) foram de 0,8203 e 0,8662 para o verão e inverno, respectivamente. Apesar de conseguir simular a entrada da frente fria no CEP nos mesmos dias dos dados observados, o modelo não foi capaz de reproduzir com precisão os valores de velocidade do vento nos dois cenários. Apresentando um EMR de 1,8243 e o $r^2 = 0,0372$ para o Cenário 1 e um EMR de 1,1773 e $r^2 = 0,0351$.

Via de regra, campos vetoriais são os mais complicados de serem simulados por modelos atmosféricos, a dificuldade de representar corretamente todos os detalhes topográficos que influenciam localmente nesses campos se configura como uma das principais fontes de erro. Esse fator pode ser uma das possíveis explicações para as diferenças observadas entre o campo de vento simulado e o

medido pela estação meteorológica de Paranaguá. Uma vez que o anemômetro em uma estação é instalado a 10m de altura, gradientes topográficos locais, como a existência de pequenos morros, edificações, etc, influenciam diretamente nas medidas dessa variável, ao passo que essas interferências não são representados pela grade do modelo atmosférico.

Na análise espacial dos campos de vento gerados pelo modelo WRF é possível observar que o modelo foi capaz de representar a geração e o deslocamento dos sistemas frontais. Características de larga escala, como a posição do centro de baixa pressão, o momento da inversão do fluxo e a intensidade das correntes foram representados em ambos os cenários em concordância com os dados observados. A partir da análise das imagens de campos de vento para o primeiro domínio da grade nota-se a mudança de direção do vento após a passagem do sistema frontal frio, de Norte/Nordeste para Sul. Os resultados demonstram que os centros de baixa pressão associados as frentes frias se deslocam do Sul em direção ao Norte e que a direção do vento acompanha as isolinhas de pressão.

Para análise da influência da passagem de sistemas frontais na hidrodinâmica do estuário foi utilizado o modelo hidrodinâmico Delft3D. Testes de sensibilidade, demonstraram que a maré é o fator predominante nas variações de níveis do estuário, correspondendo a cerca de 99,8% das variações de níveis. Apesar de corresponderem a apenas 0,2% a ação de outras forçantes (ação do vento, ondas, rios, pressão e de erros gerados durante a simulação da maré) também desempenham um papel importante na hidrodinâmica estuarina, podendo causar alterações de até cerca de 0,40 m no nível médio de água do estuário.

Em ambos os cenários o campo de correntes demonstrou que após a entrada da frente ocorre mudança na direção das correntes costeiras e estuarinas, que passam a seguir a direção do sistema frontal fluindo em direção ao Norte. No Cenário 1 foi possível observar a intensificação das correntes, enquanto que no Cenário 2 não se nota alterações significativas na intensidade das correntes com a entrada da frente fria.

Avaliando as componentes zonal e meridional das correntes observa-se que a componente U da velocidade horizontal no Cenário 1 apresentou maior variação entre os valores máximo e mínimo quando comparado com o Cenário 2, obtendo um desvio padrão de 0,00616 para o verão e 0,00449 para inverno. Para a componente V nos dois cenários não foram observadas diferenças entre as variações, apresentando um desvio padrão de 0,01209 e 0,01001 para o Cenário 1 e 2, respectivamente.

Com relação aos níveis de água, durante a passagem do sistema frontal o Cenário 1 apresentou menor variação quando comparado com o Cenário 2. Os valores máximo e mínimo para o verão foram de 0,4 cm e -0,6 cm, respectivamente e o desvio padrão foi de 0,00218. Enquanto que para o inverno o valor máximo foi de 0,8 cm, o mínimo de -0,7 cm e o desvio padrão observado foi de 0,00225.

O valor médio do nível para o cenário 1 apresentou valor negativo enquanto que para o cenário 2 o valor médio foi positivo. Lembrando que em ambos os casos, devido a escala dos sistemas frontais e a estes perdurarem por aproximadamente 60 horas, existe a ação da forçante de Coriolis sobre os fluxos. Com isso, em ambos os cenários deveria ser observado bombeamento de água para o interior do estuário, provocando um aumento do seu nível médio. Com base nos resultados esse aumento só foi observado nas simulações referentes ao Cenário 2. O Cenário 1 apresentou média negativa, sugerindo bombeamento para fora do estuário, contrário ao que se esperava. Provavelmente esse fato ocorreu pelas maiores intensidades de vento predominantemente Nordeste que antecederam a entrada do sistema frontal durante o Cenário 1.

Como pode ser observado, tanto nos testes preliminares, com a imposição de ventos paralelos a linha de costa, quanto em condições mais realistas, com a utilização de campos de vento gerados pelas passagens de sistemas frontais, o principal efeito ocorrido foi o bombeamento de água para o interior do estuário devido ao efeito de Coriolis associado com a direção predominante dos campos de vento (Sul) gerados pelas frentes frias. É importante ressaltar que a circulação hidrodinâmica sobre a plataforma continental, entre as isóbatas de 50m e 250m, se encontra dominada pela presença da Corrente do Brasil, e durante o verão ocorre

uma maior penetração dessas águas, mais quentes e salinas, sobre a plataforma. O efeito da ação do campo de vento gerado pelos sistemas frontais pode ainda gerar uma maior intrusão das águas da corrente do Brasil, podendo vir a atingir o interior do estuário, com possíveis implicações na produtividade marinha.

9. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Afim de realizar estudos mais detalhados da interação do vento com a hidrodinâmica do Complexo Estuarino de Paranaguá recomenda-se a análise, em conjunto com o campo de correntes, dos campos de ondas da região, como também a realização de mais cenários de passagem de frentes frias. Recomenda-se a realização de testes com diferentes intensidades e persistência do campo de vento para verificar a intensidade e período mínimo necessário para que haja bombeamento significativo de água para o interior do estuário. E por fim sugere-se a realização de estudos com aninhamentos de grade que compreendam a plataforma continental e a Corrente do Brasil, para análise da interação da Corrente do Brasil com a zona costeira e estuarina paranaense, quando ocorre a passagem de sistemas frontais frios na região.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHRENS, C. Donald. **Meteorology today: an introduction to weather, climate, and the environment**. Cengage Learning, 2012.

ALMEIDA, J. F. F. **Modelação da hidrodinâmica e dinâmica sedimentar do estuário do rio Douro**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia, Universidade do Minho. 2013.

ANDRADE, K. M. Climatologia e comportamento dos sistemas frontais sobre a América do Sul. **Climatologia e comportamento dos sistemas frontais sobre a América do Sul**, 2005.

APPA, <http://www.portosdoparana.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=26>

BERNARDO, J. W Y. **Interpretation and Applicability of Residence Times in Reservoirs**. Curitiba. Dissertação de Mestrado. Departamento de Hidráulica e Saneamento. Universidade Federal do Paraná. 2013.

CAMARGO, R. **Estudo numérico das circulações atmosférica e oceânica na região da Baía de Paranaguá**. São Paulo. Tese de Doutorado. Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo-USP. 181p. 1998.

CAMARGO, R.; MARONE, E.; SILVA DIAS, P. L. Detecção do sinal de brisa no registro de vento de Pontal do Sul (PR). In: **Congresso Brasileiro de Meteorologia**. Rio de Janeiro: Sbmec, 1996. p. 1036-1040.

CARDOSO, D. H.; DOURADO M. Modelagem unidimensional da camada limite oceânica durante a passagem de uma frente fria na região da confluência Brasil-Malvinas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 3, p. 367-378, 2014.

CARVALHO, D. J. S. **Optimização do modelo numérico de previsão do tempo WRF no contexto de previsão e produção de energia eólica**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Física, Universidade de Aveiro. 2009.

CASPERS, H. Estuaries: Analysis of Definitions and Biological Considerations In: estuaries, G. H. Lauff (Ed.), **American Association for the Advance of Science**, nº83, Washington D. C 1967.

CONSELVAN, A. **Implementação do modelo atmosférico WRF acoplado com o modelo hidrológico TopModel para a bacia de União da Vitória**. 2006. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado.

DA SILVA, Margarida Cardoso. Estuários–critérios para uma classificação ambiental. RBRH - **Revista Brasileira de Recursos Hídricos** Volume 5 n.1 Jan/Mar 2000, 25-35 2000.

DA SILVA, ADAIANA F. GOMES; FISCH, GILBERTO. Avaliação do Modelo WRF para a Previsão do Perfil do Vento no Centro de Lançamento de Alcântara. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 2, p. 259-270, 2014.

DANNI-OLIVEIRA, I. M.; MENDONÇA, F. Climatologia noções básicas e climas do Brasil. **São Paulo: Oficina de Textos**, 2007.

FAIRBRIDGE, R. W. The Estuary: its Definition and Geodynamic Cycle. In: Chemistry and Biogeochemistry of Estuaries, E. Olausson & I. Cato (Eds.) p1-35, **Interscience Publication**, John Wiley and Sons, New York. 1980.

FALCONER, R. A. An introduction to nearly horizontal flows. **Coastal, estuarial and harbour engineers' reference book**, p. 27-36, 1993.

FALCONER, R. A.; LIN, B. Three-dimensional modelling of water quality in the Humber Estuary. **Water Research**, v. 31, n. 5, p. 1092-1102, 1996.

FEDOROVA, N. Meteorologia sinótica. Universidade Federal de Pelotas, **Editora Gráfica Universitária – UFPel**, v. 1, 1999.

FRAZÃO, Eugênio Pires. **Caracterização hidrodinâmica e morfo-sedimentar do estuário Potengi e áreas adjacentes: subsídios para controle e recuperação ambiental no caso de derrames de hidrocarboneto**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2003.

HARARI, J; DE CAMARGO, R. Simulação da propagação das nove principais componentes de maré na plataforma sudeste brasileira através de modelo numérico hidrodinâmico. **Boletim do Instituto Oceanográfico**, v. 42, n. 1-2, p. 35-54, 1994.

HÄRTER, F. P. Avaliação do modelo WRF para o ano de 2009. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 37, n. 1, p. 27-35, 2014.

HYDRAULICS, Delft. Delft3D-Flow user's manual: simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. **WL Delft Hydraulics, Netherland**, 2014.

IPARDES, **Zoneamento do litoral parananense** (Convênio SEPL/IPARDES). Curitiba, 1989, p.175

JIANG, Y.; KIRKMAN, H.; HUA, A. (2001). Megacity development: managing impacts on marine environments. **Ocean & Coastal Management**, p.293–318.

KJERFVE, B. **Manual for investigation of hydrological Processes in Mangrove Ecosystems**. UNESCO/UNDP. 79p. 1990.

LAMOUR, Marcelo Renato. **Morfodinâmica sedimentar da desembocadura do complexo estuarino de paranaguá–pr**. 2007. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná.

LANA, P.C.; MARONE, E.; LOPES, R. M. & MACHADO, E. C. The subtropical estuarine complex os Paranaguá Bay, Brazil. Springer- Verlag, Berlin Hheidelberg, **Ecological Studies**, vol. 144, p:131-145. 2001.

LANKFORD, T. T. **Aviation weather handbook**. McGraw Hill Professional, 2000.

LESSER, G. R. et al. Development and validation of a three-dimensional morphological model. **Coastal engineering**, v. 51, n. 8, p. 883-915, 2004.

LOPES, G., M. **Aplicação de um modelo numérico hidrodinâmico para as Baías de Paranaguá e Antonina-PR**. 2010. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná.

LUTGENS, F.K., and TARBUCK, E.J., 2001. *The Atmosphere*, 8th edn. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall.

MACHADO, J. P. **Resposta das circulações oceânica e atmosférica associada ao enfraquecimento da circulação termohalina global**. 2009. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa, Brasil.

MARONE E. & CAMARGO R. Efeitos de maré meteorológica na Baía de Paranaguá, PR. **Neritica**. 8(1-2): 73-85. 1994.

MARONE E. & GUIMARÃES, M.R. & Prata JR., V.P. & KLINGENFUSS, M.S. & CAMARGO R. Caracterização física das Condições Oceanográficas, Meteorológicas e Costeiras das zonas Estuarinas da Baía de Paranaguá, PR. **VI Congresso Latinoamericano de Ciencias del Mar**. Mar del Plata, Argentina. 1995.

MAYERLE, R. NARAYANAN, R. TALAL, E., KHAIRI, A., WAHAB, A. A case study of sediment transport in the Paranagua Estuary Complex in Brazil. **Ocean Engineering**, v. 106, p. 161-174, 2015.

MENDONÇA, Francisco. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. 2007.

MIRANDA, L. B. Cinemática e dinâmica de estuários. São Paulo: Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (IOF827), v. 1. 1996.

MIRANDA, L. B. Sistemas estuarinos de planície costeira: estrutura dinâmica, processos de mistura e aplicações. In: SIMPOSIO DE ECOSSISTEMAS DA COSTA SUL E SUDESTE BRASILEIRA: estrutura, função e manejo, 2., Águas de Lindóia, SP. Anais... Águas de Lindóia, SP: ACIESP, v. 71, n. 2, p. 1-46. 1990.

MIRANDA, L., B de; CASTRO, BM de; KJERFVE, Björn. Princípios de oceanografia física de estuários. **São Paulo: EDUSP**, 2002.

NIMAD. **Interações entre os processos produtivos, meio ambiente e qualidade de vida na região da baía de Paranaguá e região metropolitana de Curitiba**: geração de propostas de desenvolvimento. Curitiba. 1994

NOERNBERG, M. A.; MARONE, E.; ANGULO, R. J. Coastal currents and sediment transport in Paranaguá estuary complex navigation channel. **Boletim Paranaense de Geociências**, v. 60, n. 61, p. 45-54, 2007.

NOERNBERG. M. A. **Processos morfodinâmicos no complexo estuarino de Paranaguá-Paraná Brasil: um estudo a partir de dados in situ e landsat**. Curitiba, 180 f. Dissertação (Doutor em Geologia Ambiental) – setor de Ciências da terra, Universidade Federal do Paraná. 2001.

OLIVEIRA, L.L.; VIANELLO, R.L.; FERREIRA N.J. **Meteorologia Fundamental**. Erichim, RS: EDIFAPES, 2001. 432 p.

PRITCHARD, D. W. **What is an estuary: physical viewpoint**. **Estuaries**, v. 83, p. 3-5, 1967.

RIBAS, T. M. **Implementação de modelo numérico para estudo hidrodinâmico das baías de Antonina e Paranaguá- PR**. 121 f. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Setor de Tecnologia – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

SCUDELARI, A. C.; DE FIGUEIRÊDO, L. R.; ROSMAN, P. C. **Estudo da circulação hidrodinâmica do estuário do Rio Potengi devida a ação do vento.** VI Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica, 2008.

SKAMAROCK, W. C.; KLEMP J. B.; DUDHIA J.; GILL D. O.; BARKER M. D; DUDA M. G.; HUANG X.; WANG W.; POWERS J. G. **A description of the advanced research WRF version 3.** National Center For Atmospheric Research Boulder Co Mesoscale and Microscale Meteorology Div, 2008.

SOTO, Y. J. M. **A modelagem hidrodinâmica como apoio a tomada de decisão em caso de derrame de óleo na parte interna do complexo estuarino Antonina-Paranaguá-PR.** Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná. 2004.

STOWA/RIZA. **Good Modelling practice handbook.** STOWA report 99-05, Dutch dept. of Public Works, Institute for Inland Water Management and Waste Water Treatment report 99.036.1999.

Warner, J. C., Armstrong, B. N., He, R., Zambon, J. B., Olabarrieta, M., Voulgaris, G. & Haas, K. A. (2012, December). Development and applications of a Coupled-Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport (COAWST) Modeling System. In AGU **Fall Meeting Abstracts** (Vol. 1, p. 1642).