

Maria Fernanda Mendes Fiedler

**Dinâmica estuarina em cenários de aumento do nível do mar:  
estuário de Santos, SP**

Dissertação apresentada ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Oceanografia, área de Oceanografia Geológica.

Orientador:

Prof. Dr. Eduardo Siegle

São Paulo

2015

Universidade de São Paulo  
Instituto Oceanográfico

**Dinâmica estuarina em cenários de aumento do nível do mar:  
estuário de Santos, SP**

Maria Fernanda Mendes Fiedler

Dissertação apresentada ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo,  
como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa  
de Oceanografia, área de Oceanografia Geológica.

Julgada em \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
Prof(a). Dr(a).

\_\_\_\_\_  
Conceito

\_\_\_\_\_  
Prof(a). Dr(a).

\_\_\_\_\_  
Conceito

\_\_\_\_\_  
Prof(a). Dr(a).

\_\_\_\_\_  
Conceito

## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	iv
RESUMO .....	v
ABSTRACT.....	vi
LISTA DE FIGURAS .....	vii
LISTA DE TABELAS .....	xii
1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1. ÁREA DE ESTUDO.....	17
1.2. OBJETIVOS .....	20
2. MATERIAIS E MÉTODOS .....	21
2.1. ANÁLISE DOS DADOS.....	21
2.2. MODELAGEM HIDRODINÂMICA .....	23
2.2.1. Descrição do Modelo .....	23
2.2.2. Modelo Implementado .....	34
Grades Computacionais .....	34
Condições de Contorno .....	36
Batimetria .....	42
2.2.3. Avaliação do Modelo Implementado (Validação) .....	43
2.2.4. Cenários IPCC.....	46
3. RESULTADOS .....	47
3.1. ANÁLISE DOS DADOS.....	47
Elevação da Superfície do Mar .....	47
Correntes.....	54
Constantes Harmônicas .....	71
3.2. AVALIAÇÃO DO MODELO IMPLEMENTADO (VALIDAÇÃO).....	73
3.2.1. Constantes Harmônicas .....	74
3.2.2. Dados Medidos.....	75
3.3. CENÁRIOS IPCC .....	89
4. DISCUSSÃO .....	117
4.1. LIMITAÇÕES.....	122
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	123
6. BIBLIOGRAFIA.....	125

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Eduardo Siegle, pela orientação acadêmica, confiança e motivação.

À empresa e equipe Tetra Tech, pelo incentivo, ensinamentos e fornecimento de dados utilizados neste estudo.

À empresa Companhia Docas do Estado de São Paulo - CODESP, pelo fornecimento de dados utilizados neste estudo.

A todos que me aturaram durante o período.

## RESUMO

Este trabalho teve como objetivo analisar os possíveis efeitos de um aumento do nível do mar no padrão de correntes no Sistema Estuarino de Santos (SP), através do uso do modelo hidrodinâmico do Delft3D-FLOW, considerando diferentes taxas de aumento de acordo com o quinto relatório do *Intergovernmental Panel on Climate Change (AR5)*. Os resultados indicam alteração na velocidade da corrente ao longo do domínio implementado, mais evidente durante a sizígia. Observa-se um aumento da magnitude da corrente em praticamente todo o Canal de São Vicente e redução da magnitude nos canais do Porto de Santos, canal de Bertioga e na região interna do Estuário de Santos. Os resultados do modelo numérico foram comparados com diversos dados coletados na região de estudo e verificou-se a correta representação dos padrões de circulação da área. Este estudo comprovou a importância de utilizarmos resultados de um modelo de maior escala (HYCOM) como forçantes, através da condição de fronteira denominada Riemann, permitindo que o modelo represente fenômenos de baixa frequência, que geram circulações e variações do nível do mar com a mesma ordem de grandeza dos efeitos da maré astronômica na área de estudo.

Palavras chave: Elevação do Nível do Mar, Modelagem Hidrodinâmica, Sistema Estuarino de Santos, Delft3D-FLOW, Riemann, HYCOM.

## ABSTRACT

This study aimed to analyze the possible effects of a sea level rise in Sistema Estuarino de Santos (SP) circulation pattern, through the use of Delft3D-FLOW Hydrodynamic Model considering different elevation rates according to *Intergovernmental Panel on Climate Change* fifth report (AR5). The results indicate change in the current's magnitude, being more evident during the spring tide. There is an increase in the velocity practically all over São Vicente Channel and the reduction of magnitude in the Porto de Santos and Bertioga channels and in the inner region of the estuary. The numerical model results were compared with several measured data and it was verified that the model correctly representats the circulation patterns of the area. This study proved the importance of using results of a larger scale model (HYCOM), forced through a boundary condition called Riemann, allowing the model to represent low frequency phenomena, which generate sea level variations with the same order of magnitude of the effects of the astronomical tide in the study area.

Keywords: Sea Level Rise, Hydrodynamic Model, Sistema Estuarino de Santos, Delft3D-FLOW, Riemann, HYCOM.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da Área de Estudo. ....	18
Figura 2 - Localização dos ADCPs instalados pelo LDC da USP para coleta de dados oceanográficos. ....	22
Figura 3 - Grades computacionais utilizadas na modelagem hidrodinâmica. ....	34
Figura 4 - Detalhe da grade apresentada em vermelho na Figura 3. ....	35
Figura 5 - Grade 04 implementada para representar a dinâmica do Estuário de Santos. ....	36
Figura 6 - Localização dos contornos abertos na Grade 01 (em azul). ....	37
Figura 7 – Série temporal Riemann, utilizada como forçante de uma das bordas superficiais da Grade 02 do modelo hidrodinâmico, nas proximidades da costa..	39
Figura 8 – Série temporal Riemann, utilizada como forçante de uma das bordas superficiais da Grade 02 do modelo hidrodinâmico, nas regiões mais profundas do modelo.....	39
Figura 9 - Localização dos contornos abertos na Grade 04 (em vermelho). As bordas com contorno azul representam as que foram forçadas com resultados da Grade 03. ....	40
Figura 10 - Batimetria interpolada às grades computacionais. A escala de cores apresenta o valor em metros. ....	42
Figura 11 – Série temporal de elevação da superfície do mar e nível médio (em metros) referente ao ADCP fundeado em Santos. ....	48
Figura 12 – Espectro de amplitudes da elevação. O eixo X indica a frequência (em ciclos por dia) e o eixo Y indica a amplitude (em metros) referente à série temporal apresentada na Figura 11. ....	48
Figura 13 – Série temporal de elevação da superfície do mar e nível médio (em metros) referente ao ADCP fundeado em São Vicente. ....	49
Figura 14 – Espectro de amplitudes da elevação. O eixo X indica a frequência (em ciclos por dia) e o eixo Y indica a amplitude (em metros) referente à série temporal apresentada na Figura 13. ....	50
Figura 15 – Série temporal de elevação da superfície do mar e nível médio (em metros) referente ao ADCP fundeado em Bertioga. ....	51
Figura 16 – Espectro de amplitudes da elevação. O eixo X indica a frequência (em ciclos por dia) e o eixo Y indica a amplitude (em metros) referente à série temporal apresentada na Figura 15. ....	51
Figura 17 – Vetores de corrente ao longo da coluna d'água para o período de 9 de junho a 9 de julho de 2014, referentes ao ADCP fundeado em Santos. A parte superior da figura ilustra a corrente superficial e, a parte inferior ilustra a corrente no fundo. O tamanho dos vetores é proporcional à velocidade da corrente e a direção do vetor segue a convenção vetorial.....	54
Figura 18 – Vetores de corrente ao longo da coluna d'água para o período de 9 de junho a 9 de julho de 2014, referentes ao ADCP fundeado em São Vicente. A parte superior da figura ilustra a corrente superficial e, a parte inferior ilustra a corrente no fundo. O tamanho dos vetores é proporcional à velocidade da corrente e a direção do vetor segue a convenção vetorial. ....	55

Figura 19 – Vetores de corrente ao longo da coluna d'água para o período de 9 de junho a 9 de julho de 2014, referentes ao ADCP fundeado em Bertioga. A parte superior da figura ilustra a corrente superficial e, a parte inferior ilustra a corrente no fundo. O tamanho dos vetores é proporcional à velocidade da corrente e a direção do vetor segue a convenção vetorial. ....	55
Figura 20 - Séries temporais das componentes u e v da corrente superficial (em m/s), referentes ao ADCP fundeado em Santos. ....	56
Figura 21 - Séries temporais das componentes u e v em meia água (em m/s), referentes ao ADCP fundeado em Santos. ....	57
Figura 22 - Séries temporais das componentes u e v no fundo (em m/s), referentes ao ADCP fundeado em Santos. ....	57
Figura 23 – Histograma direcional (painel esquerdo) e rosa de correntes (painel direito) na superfície, referentes ao ADCP fundeado em Santos. ....	58
Figura 24 - Histograma direcional (painel esquerdo) e rosa de correntes (painel direito) em meia água, referentes ao ADCP fundeado em Santos. ....	58
Figura 25 - Histograma direcional (painel esquerdo) e rosa de correntes (painel direito) junto ao fundo, referentes ao ADCP fundeado em Santos. ....	59
Figura 26 - Séries temporais das componentes u e v da corrente superficial (em m/s), referentes ao ADCP fundeado em São Vicente. ....	61
Figura 27 - Séries temporais das componentes u e v em meia água (em m/s), referentes ao ADCP fundeado em São Vicente. ....	62
Figura 28 - Séries temporais das componentes u e v no fundo (em m/s), referentes ao ADCP fundeado em São Vicente. ....	62
Figura 29 – Histograma direcional (painel esquerdo) e rosa de correntes (painel direito) na superfície, referentes ao ADCP fundeado em São Vicente. ....	63
Figura 30 - Histograma direcional (painel esquerdo) e rosa de correntes (painel direito) em meia água, referentes ao ADCP fundeado em São Vicente. ....	63
Figura 31 - Histograma direcional (painel esquerdo) e rosa de correntes (painel direito) junto ao fundo, referentes ao ADCP fundeado em São Vicente. ....	64
Figura 32 - Séries temporais das componentes u e v da corrente superficial (em m/s), referentes ao ADCP fundeado em Bertioga. ....	66
Figura 33 - Séries temporais das componentes u e v em meia água (em m/s), referentes ao ADCP fundeado em Bertioga. ....	67
Figura 34 - Séries temporais das componentes u e v no fundo (em m/s), referentes ao ADCP fundeado em Bertioga. ....	67
Figura 35 – Histograma direcional (painel esquerdo) e rosa de correntes (painel direito) na superfície, referentes ao ADCP fundeado em Bertioga. ....	68
Figura 36 - Histograma direcional (painel esquerdo) e rosa de correntes (painel direito) em meia água, referentes ao ADCP fundeado em Bertioga. ....	68
Figura 37 - Histograma direcional (painel esquerdo) e rosa de correntes (painel direito) junto ao fundo, referentes ao ADCP fundeado em Bertioga. ....	69
Figura 38 – Constantes harmônicas da FEMAR para o Porto de Santos – SP. ....	72
Figura 39 – Constantes harmônicas da FEMAR para a Ilha Barnabé– SP. ....	73
Figura 40 - Comparações realizadas entre a elevação do nível do mar gerada pelo modelo (vermelho) e série temporal gerada através de previsão harmônica (azul), para o Porto de Santos. A elevação é apresentada em metros. ....	75

Figura 41 - Comparações realizadas entre a elevação do nível do mar gerada pelo modelo (vermelho) e série temporal gerada através de previsão harmônica (azul), para a Ilha Barnabé. A elevação é apresentada em metros.....	75
Figura 42 - Comparações realizadas entre a elevação do nível do mar gerada pelo modelo (vermelho) e dados medidos em campo (azul). A elevação é apresentada em metros.....	76
Figura 43 - Comparações realizadas entre a elevação do nível do mar gerada pelo modelo de maré (vermelho) e dados medidos em campo (azul). A elevação é apresentada em metros. ....	77
Figura 44 - Comparações realizadas entre as componentes u e v da corrente superficial geradas pelo modelo modelo (vermelho) e medidas em campo (azul). As componentes da corrente são apresentadas em metros por segundo. ....	78
Figura 45 - Comparações realizadas entre as componentes u e v da corrente superficial geradas pelo modelo modelo (vermelho) e medidas em campo (azul). As componentes da corrente são apresentadas em metros por segundo. ....	79
Figura 46 - Comparações realizadas entre as componentes u e v da corrente de fundo geradas pelo modelo modelo (vermelho) e medidas em campo (azul). As componentes da corrente são apresentadas em metros por segundo. ....	80
Figura 47 - Comparações realizadas entre as componentes u e v da corrente de fundo geradas pelo modelo modelo (vermelho) e medidas em campo (azul). As componentes da corrente são apresentadas em metros por segundo. ....	81
Figura 48 - Comparações realizadas entre a elevação do nível do mar gerada pelo modelo (vermelho) e dados medidos em campo (azul). A elevação é apresentada em metros.....	82
Figura 49 - Comparações realizadas entre as componentes u e v da corrente superficial geradas pelo modelo modelo (vermelho) e medidas em campo (azul). As componentes da corrente são apresentadas em metros por segundo. ....	83
Figura 50 - Comparações realizadas entre as componentes u e v da corrente superficial geradas pelo modelo modelo (vermelho) e medidas em campo (azul). As componentes da corrente são apresentadas em metros por segundo. ....	84
Figura 51 - Comparações realizadas entre as componentes u e v da corrente de fundo geradas pelo modelo modelo (vermelho) e medidas em campo (azul). As componentes da corrente são apresentadas em metros por segundo. ....	85
Figura 52 - Comparações realizadas entre as componentes u e v da corrente de fundo geradas pelo modelo modelo (vermelho) e medidas em campo (azul). As componentes da corrente são apresentadas em metros por segundo. ....	86
Figura 53 - Comparações realizadas entre a elevação do nível do mar gerada pelo modelo (vermelho) e dados medidos em campo (azul). A elevação é apresentada em metros.....	87
Figura 54 - Comparações realizadas entre a elevação do nível do mar gerada pelo modelo de maré (vermelho) e dados medidos em campo (azul). A elevação é apresentada em metros. ....	88
Figura 55 - Campo instantâneo de correntes para um instante de maré enchente (painel esquerdo) e vazante (painel direito) para o Canal de São Vicente. A escala lateral de cores apresenta a magnitude, em metros por segundo, e os vetores apontam a direção da corrente. ....	90

Figura 56 - Campo instantâneo de correntes para um instante de maré enchente (painel esquerdo) e vazante (painel direito) para o Canal do Porto de Santos. A escala lateral de cores apresenta a magnitude, em metros por segundo, e os vetores apontam a direção da corrente. ....	90
Figura 57 - Campo instantâneo de correntes para um instante de maré enchente (painel esquerdo) e vazante (painel direito) para o Canal de Bertioga. A escala lateral de cores apresenta a magnitude, em metros por segundo, e os vetores apontam a direção da corrente. ....	91
Figura 58 - Magnitude das correntes superficiais para um instante de maré enchente. ....	92
Figura 59 - Magnitude das correntes superficiais para um instante de maré vazante. ....	93
Figura 60 - Magnitude das correntes superficiais para um instante de maré enchente, no Canal de São Vicente. ....	94
Figura 61 - Magnitude das correntes superficiais para um instante de maré vazante, no Canal de São Vicente. ....	95
Figura 62 - Magnitude das correntes superficiais para um instante de maré enchente, no Canal do Porto de Santos. ....	95
Figura 63 - Magnitude das correntes superficiais para um instante de maré vazante, no Canal do Porto de Santos. ....	96
Figura 64 - Magnitude das correntes superficiais para um instante de maré enchente, no Canal de Bertioga. ....	96
Figura 65 - Magnitude das correntes superficiais para um instante de maré vazante, no Canal de Bertioga. ....	97
Figura 66 - Vetores de correntes superficiais para um instante de maré enchente, no Canal de São Vicente. ....	98
Figura 67 - Vetores de correntes superficiais para um instante de maré enchente, no Canal do Porto de Santos. ....	98
Figura 68 - Magnitude da corrente média na coluna d'água para um instante de maré enchente. ....	100
Figura 69 - Magnitude da corrente média na coluna d'água para um instante de maré vazante. ....	101
Figura 70 - Magnitude da corrente média na coluna d'água para um instante de maré enchente, no Canal de São Vicente. ....	102
Figura 71 - Magnitude da corrente média na coluna d'água para um instante de maré vazante, no Canal de São Vicente. ....	102
Figura 72 - Magnitude da corrente média na coluna d'água para um instante de maré enchente, no Canal do Porto de Santos. ....	103
Figura 73 - Magnitude da corrente média na coluna d'água para um instante de maré vazante, no Canal do Porto de Santos. ....	103
Figura 74 - Magnitude da corrente média na coluna d'água para um instante de maré enchente, no Canal de Bertioga. ....	104
Figura 75 - Magnitude da corrente média na coluna d'água para um instante de maré vazante, no Canal de Bertioga. ....	104
Figura 76 – Localização dos pontos de comparação das séries temporais de corrente, nos canais de Santos e São Vicente. ....	105

Figura 77 – Componentes U e V da corrente média na coluna d'água (m/s) no Canal de São Vicente, considerando os cenários 1 e 3 testados durante um período de sizígia em 2013.....	106
Figura 78 – Componentes U e V da corrente média na coluna d'água (m/s) no Canal de São Vicente, considerando os cenários 1 e 3 testados durante um período de quadratura em 2013. ....	107
Figura 79 – Componentes U e V da corrente média na coluna d'água (m/s) no Canal de Santos, considerando os cenários 1 e 3 testados durante um período de sizígia em 2013.....	108
Figura 80 – Componentes U e V da corrente média na coluna d'água (m/s) no Canal de Santos, considerando os cenários 1 e 3 testados durante um período de quadratura em 2013. ....	108
Figura 81 - Magnitude das correntes médias na coluna d'água para um instante de maré enchente, no Estuário de Santos. ....	110
Figura 82 - Magnitude das correntes médias na coluna d'água para um instante de maré vazante, no Estuário de Santos. ....	111
Figura 83 – Grade 04 (em preto) e Grade 04 ampliada (em rosa) na parte oeste do Canal de São Vicente. ....	113
Figura 84 - Magnitude da corrente média na coluna d'água para um instante de maré enchente, no Canal de São Vicente. Ambos painéis apresentam o resultado para o Cenário 3. O painel esquerdo apresenta a Grade 04 original e o painel direito, a Grade 04 ampliada. ....	114
Figura 85 - Magnitude da corrente média na coluna d'água para um instante de maré vazante, no Canal de São Vicente. Ambos painéis apresentam o resultado para o Cenário 3. O painel esquerdo apresenta a Grade 04 original e o painel direito, a Grade 04 com células adicionais na porção oeste. ....	115
Figura 86 – Magnitude da corrente média na coluna d'água (m/s) no Canal de São Vicente, considerando o cenário 3, com a Grade 04 e Grade 04 ampliada, durante um período de sizígia em 2013.....	116
Figura 87 – Magnitude da corrente média na coluna d'água (m/s) no Canal de São Vicente, considerando o cenário 3, com a Grade 04 e Grade 04 ampliada, durante um período de quadratura em 2013.....	116

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Localização dos ADCPs fundeados na área de estudo.....	21
Tabela 2 - Dimensões e resolução das grades implementadas. ....	36
Tabela 3 - Vazões médias mensais dos 65 rios e córregos considerados como forçantes do modelo hidrodinâmico. ....	41
Tabela 4 - Classificação do RMAE por ranges.....	43
Tabela 5 – Constantes harmônicas da maré, extraídas a partir da série temporal de elevação apresentada na Figura 11 (ADCP localizado em Santos). ....	52
Tabela 6 – Constantes harmônicas da maré, extraídas a partir da série temporal de elevação apresentada na Figura 13 (ADCP localizado em São Vicente). ....	53
Tabela 7 – Constantes harmônicas da maré, extraídas a partir da série temporal de elevação apresentada na Figura 15 (ADCP localizado em Bertioga). ....	53
Tabela 8 - Ocorrência conjunta de intensidade (cm/s) e direção (°) da corrente na superfície, referente ao ADCP fundeado em Santos.....	59
Tabela 9 - Ocorrência conjunta de intensidade (cm/s) e direção (°) da corrente em meia água, referente ao ADCP fundeado em Santos. ....	59
Tabela 10 - Ocorrência conjunta de intensidade (cm/s) e direção (°) da corrente junto ao fundo, referente ao ADCP fundeado em Santos. ....	60
Tabela 11 - Ocorrência conjunta de intensidade (cm/s) e direção (°) da corrente na superfície, referente ao ADCP fundeado em São Vicente.....	64
Tabela 12 - Ocorrência conjunta de intensidade (cm/s) e direção (°) da corrente em meia água, referente ao ADCP fundeado em São Vicente. ....	65
Tabela 13 - Ocorrência conjunta de intensidade (cm/s) e direção (°) da corrente junto ao fundo, referente ao ADCP fundeado em São Vicente. ....	65
Tabela 14 - Ocorrência conjunta de intensidade (cm/s) e direção (°) da corrente na superfície, referente ao ADCP fundeado em Bertioga.....	69
Tabela 15 - Ocorrência conjunta de intensidade (cm/s) e direção (°) da corrente em meia água, referente ao ADCP fundeado em Bertioga. ....	70
Tabela 16 - Ocorrência conjunta de intensidade (cm/s) e direção (°) da corrente junto ao fundo, referente ao ADCP fundeado em Bertioga. ....	70
Tabela 17 – Parâmetros estimados ao compararmos os resultados de modelo com os dados medidos e previsões harmônicas de maré. ....	88
Tabela 18 – Parâmetros estimados ao compararmos os resultados de modelo com os dados de corrente medidos.....	89

## 1. INTRODUÇÃO

A ocupação e utilização das regiões costeiras aumentou drasticamente no século 20, e tende a continuar no século 21. Poucas áreas costeiras encontram-se fora de influência das pressões humanas. A população ocupa os deltas, ilhas e estuários ao redor do mundo, alterando estes ambientes (NICHOLLS et al., 2007).

Estuário é um corpo de água costeiro que se liga com o oceano aberto, no interior do qual a água do mar é mensuravelmente diluída pela água doce, oriunda da drenagem continental (PRITCHARD, 1952). São locais de grande importância ecológica, pois recebem aporte de nutrientes da drenagem continental, sendo ambientes de grande produtividade biológica. Cerca de 60% das grandes cidades se desenvolveram em torno de estuários (MIRANDA et al., 2012), além de que muitos estuários tornaram-se ambientes portuários e industriais.

De acordo com o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2007) os registros dos últimos anos mostram aumentos da temperatura ao redor de todo o mundo. O aumento no nível do mar é consistente com o aquecimento.

O quinto relatório de avaliação do IPCC – AR5 (*Fifth Assessment Report*, CHURCH et al., 2013) fornece uma atualização sobre o conhecimento científico relacionado às mudanças climáticas. Estes dados indicam um aumento do nível do mar do final do século 19 para o início do século 20. Estima-se que entre 1901 e 2010 a taxa de aumento do nível do mar era 1,7 mm/ano (totalizando 0,19 m). Entre 1993 e 2010 a taxa aumenta para 3,2 mm/ano (CHURCH et al., 2013; PRANDLE et al., 2015). Observações desde 1971 indicam que a expansão térmica e derretimento das geleiras explicam 75% do aumento observado e que a contribuição das geleiras da Groelândia e Antártida aumentou desde o início da década de 90, principalmente devido ao aquecimento do oceano adjacente.

Ao comparar os resultados do AR5 com o AR4 (relatório anterior do IPCC) observa-se que no AR5 as projeções de aumento do nível do mar são superiores às do AR4, principalmente devido às melhorias nas modelagens.

Com o aumento das taxas previstas não é de se surpreender que tanta atenção seja dada aos efeitos deste fenômeno.

Jochen et al. (2015) alertam que os cenários do IPCC são muitas vezes inapropriados e incompletos para o gerenciamento de áreas costeiras pois excluem o potencial de aumentos extremos de nível do mar. Os cenários são obtidos através de modelos baseados em processos, que por sua vez baseiam-se nas leis da física. Como consequência, estes cenários cobrem apenas uma faixa de variação de possível aumento do nível do mar. Por exemplo, os cenários do AR5 estimam que para 2100 o aumento global do nível médio do mar varia de 0,28 a 0,98 m em relação ao período de 1986 a 2005 e a probabilidade de ficar dentro desta faixa é estimada em 66%.

No entanto, ainda que Jochen et al. (2015) aponte que os cenários do IPCC podem não representar adequadamente os riscos em zonas costeiras, parte-se da premissa que os cenários do IPCC apresentam o dado disponível mais representativo para se estudar efeitos de um aumento do nível do mar em regiões de interesse.

Estimar variações na costa devido a aumento do nível do mar e mudanças climáticas é de extrema importância para o futuro gerenciamento da linha de costa (NICHOLLS et al., 2007; CHINI et al., 2010). Espera-se a retração da linha de costa e o aumento das áreas alagadas e intrusão salina.

Projeções realizadas pelo IPCC indicaram um aumento da temperatura média global para o ano de 2100 entre 1,8 e 4° C (ALFREDINI et al., 2007). Se confirmadas as projeções, o aumento do nível médio do mar trará consequências para a pesca, a agricultura, a navegação, a recreação, o lançamento de efluentes, a proteção costeira, a produtividade biológica e a diversidade (COMISSÃO NACIONAL INDEPENDENTE SOBRE OS OCEANOS, 1998).

Mitchell et al (2015) discutem efeitos em termos de múltiplos estressores, com base em diferentes estudos: desde temas mais óbvios, como o fato de que o aumento do nível do mar leva a um aumento da salinidade em áreas costeiras e estuários, alterando o padrão de circulação e estratificação das regiões de interesse, a intrusão salina e *input* de água doce, até efeitos de aumento de tempestades em áreas costeiras. Yang et al. (2015) estudam a resposta na hidrodinâmica de um estuário devido a alterações nos fluxos dos rios e aumento do nível do mar, de acordo com projeções de mudanças climáticas.

Segundo Ross et al. (2015) a maior parte dos estudos assumem que o aumento do nível do mar não influencia na topografia de fundo, mesmo tendo conhecimento de que o aumento do nível do mar causa erosão costeira e, conseqüentemente, aumentando a deposição de sedimentos. Estudo realizado por Prandle et al. (2015) discute alterações batimétricas em estuários do Reino Unido de acordo com alterações no nível médio do mar e vazões de rios associados a mudanças climáticas globais. De acordo com os autores, as alterações na vazão dos rios impacta mais imediatamente a intrusão salina e estratificação dos estuários. Ainda, em regiões rasas um aumento de um metro no nível do mar pode causar um aumento na intensidade das correntes e na dissipação da maré, levando a alterações na distribuição dos sedimentos superficiais.

De acordo com Chini et al. (2010) as ondas que incidem na costa representam a principal componente da dinâmica costeira que deve ser estimada com relação às mudanças climáticas, uma vez que elas modificam o fluxo de sedimentos e os processos praias. Estimar as alterações nas características extremas das ondas é necessário para avaliar a estabilidade das defesas existentes e desenhos futuros. Variações na profundidade local determinam diversos processos que ocorrem com as ondas nas áreas costeiras. Ondas em combinação com maré meteorológica e maré alta acarretam em mais energia chegando na zona costeira, devido ao atraso para atingir a profundidade de quebra e reduzida fricção do fundo, induzindo forças maiores na região costeira.

A Comissão Nacional Independente Sobre os Oceanos (1998) discute que ao longo do litoral brasileiro as alterações seriam sentidas de maneira mais amena nos trechos dominados por macromarés, pois as amplitudes de maré elevadas nestas regiões já são bastante significativas. No entanto, nos trechos dominados por meso e micromarés, condições que se observam na maior parte do litoral brasileiro, as conseqüências poderiam ser notáveis, sendo compreensível que tanta atenção venha sido prestada em sistemas com pequenas variações de maré (MITCHELL et al., 2015).

Ao longo do litoral brasileiro podem ser identificadas áreas sob risco de inundação devido a um provável aumento no nível relativo do mar. Áreas de grande densidade populacional e importantes complexos industriais portuários e turísticos, como as cidades como João Pessoa (PB), Recife (PE),

Maceió (AL), Aracaju (SE), Salvador (BA), Rio de Janeiro (RJ), Vitória (ES), Santos (SP), Paranaguá (PR) e Florianópolis (SC), são potencialmente inundáveis em suas porções mais baixas (COMISSÃO NACIONAL INDEPENDENTE SOBRE OS OCEANOS, 1998).

Na costa do Estado de São Paulo, estudos de longo período para o Porto de Santos indicam uma subida do nível médio do mar com taxa de 0,1132 cm/ano (HARARI et al., 2008).

As zonas de arrebentação e estuarina são muito sensíveis a variações da ordem de alguns decímetros no nível médio do mar (Alfredini e Arasaki, 2009). Nas regiões Sudeste e Sul, ecossistemas como marismas, manguezais e faixas de transição para restinga seriam diretamente afetados. Para marismas e manguezais, um pequeno aumento do nível relativo do mar seria suficiente para acarretar mudanças na zonation desses ecossistemas. Os espaços das restingas seriam erodidos e os sedimentos retrabalhados (COMISSÃO NACIONAL INDEPENDENTE SOBRE OS OCEANOS, 1998).

A circulação, os processos de mistura e a estratificação em um estuário dependem de sua geometria, maré, descargas fluviais, gradiente de densidade da água, circulação adjacente e o vento que atua sobre a superfície livre (PRITCHARD, 1967 apud MIRANDA et al., 2012; YANG et al., 2015). Alguns estuários possuem múltiplas cabeceiras e ligações com o oceano adjacente. Onde os rios deságuam são constituídos subsistemas estuarinos com diferentes características hidrodinâmicas (MIRANDA et al., 2012).

Os movimentos que ocorrem em um estuário podem ser divididos em barotrópicos e baroclínicos. A oscilação da maré na embocadura gera uma inclinação na superfície livre e, essa oscilação promove as correntes de maré enchente (estuário acima) e vazante (estuário abaixo). Esse efeito da maré possui natureza barotrópica. O volume de água doce adicionado pelos rios geralmente se desloca pela superfície do estuário abaixo e produz diferenças de densidade ao longo do estuário, ao diluir com a água salgada. Sendo assim, são gerados movimentos nas camadas de fundo e estuário acima. Esses movimentos forçados pelo gradiente horizontal de pressão possuem natureza baroclínica (MIRANDA et al., 2012).

A modelagem numérica utiliza medições e teorias sobre o comportamento do oceano possibilitando simulação dos seus processos. A

modelagem hidrodinâmica (da circulação) constitui a base dos demais modelos em Oceanografia, uma vez que seus resultados são utilizados na modelagem de ondas, sedimentos, poluentes, etc (HARARI, 2015).

Este estudo visa avaliar os possíveis efeitos do aumento do nível do mar na variação da dinâmica do Sistema Estuarino de Santos por meio de modelos numéricos, podendo ser utilizado em diversas aplicações, tais como navegação, obras costeiras, operações de dragagem, entre outros.

## **1.1. ÁREA DE ESTUDO**

A área de estudo compreende o Sistema Estuarino de Santos, a Baía de Santos e a região costeira adjacente (Figura 1), localizados na porção central da costa do Estado de São Paulo. O maior enfoque é dado para o Sistema Estuarino de Santos, no entanto a Baía de Santos e a região costeira adjacente também são consideradas no estudo por influenciarem na circulação do Sistema Estuarino de Santos.

O Sistema Estuarino de Santos está inserido na Plataforma Continental Interna (PCI), da porção central da Plataforma Continental Sudeste do Brasil (PCSE), região delimitada ao norte por Cabo Frio (23° S) e ao sul pelo Cabo de Santa Marta (28° 40' S). A região abriga o maior porto da América Latina (o Porto de Santos) e o maior pólo industrial do país, em Cubatão (HARARI & CAMARGO, 1998).

De acordo com Sampaio (2010), baseada no censo 2000, aproximadamente 1.100.000 pessoas residem na bacia hidrográfica pertencente ao Sistema Estuarino de Santos e São Vicente, onde se situam os municípios de Cubatão, Santos, São Vicente, Guarujá e Praia Grande.



**Figura 1 - Localização da Área de Estudo.**

A Baía de Santos é influenciada tanto por águas de origem oceânica como por águas de origem continental, captadas pelos rios da bacia de drenagem do complexo Sistema Estuarino de Santos.

De acordo com Harari & Camargo (1998) e FUNDESPA (1999), as principais forçantes que influenciam a circulação na Baía são: a geomorfologia de fundo, os gradientes baroclínicos de pressão causados pelas descargas fluviais dos dois principais canais existentes (Canal do Porto e Canal de São Vicente), a co-oscilação da maré e os ventos sinóticos. De acordo com Harari & Gordon (2001), a região possui circulação bastante complexa, com contribuições de maré, de ventos e do campo de densidade. No Sistema Estuarino de Santos destaca-se o efeito da maré como principal forçante da circulação (HARARI & CAMARGO, 1998).

A onda de maré que ocorre na região é semidiurna e se propaga simultaneamente pelos canais de Santos e São Vicente, e as amplitudes variam entre 27 cm nas marés de quadratura a 123 cm nas de sizígia (HARARI & CAMARGO, 1995). As elipses das componentes de maré M2 e S2 são predominantes na área (HARARI et al., 2002).

De acordo com Alfredini & Arasaki (2009) na Baía de Santos tem-se amplitude de aproximadamente 1,5 m durante eventos de sizígia. No entanto,

durante eventos meteorológicos extremos já foram verificadas sobrelevações de até 1,0 m e rebaixamentos de até 0,5 m em relação à maré prevista.

As maiores intensidades de corrente no estuário localizam-se no Canal de Porto de Santos, com valores que chegam a ultrapassar 1 m/s (HARARI et al., 2000 apud COELHO, 2011). Já HIDROMOD-UNISANTA (1998) apud Sampaio (2010) descreve que as correntes mais intensas ocorrem nos canais do Porto de Santos (região próxima ao Guarujá) e São Vicente (entre o Mar Pequeno e a Baía de São Vicente).

Na região das bocas do estuário nota-se a presença de ondas, porém com alturas significativas sempre menores que as observadas na área costeira adjacente e Baía de Santos. No entanto para a região interior do estuário, não existem valores significativos para a altura de ondas (COELHO, 2011).

Observam-se três principais sistemas hidrográficos: Sistema Estuarino de Santos, Sistema Estuarino de São Vicente e Sistema do Canal de Bertioga. O Sistema Estuarino de Santos é representado pelo canal de entrada do Porto de Santos interligando-se ao Canal de Piaçaguera e ao Largo do Canéu, e os rios Cubatão, Mogi, Piaçaguera e Quilombo são os principais afluentes. O rio Casqueiro, um canal estuarino, faz a ligação entre os sistemas dos estuários de Santos e São Vicente. O Sistema Estuarino de São Vicente é compreendido pelo Mar Pequeno, Largo de São Vicente e o Largo da Pompeda, com os rios Boturoca ou Branco, dos Bagres, Caxeta e Acaraú. Já o Sistema do Canal de Bertioga estende-se desde o Largo do Candinho por toda face voltada ao lado continental da ilha de Santo Amaro até Bertioga ao norte, tendo como principais afluentes os rios Crumau, Cabuçu, Trindade e Itapanhau. Os 3 sistemas comunicam-se ao mar em pontos distintos internamente interligados, integrando uma mesma localidade, ao qual é dado o nome genérico de Estuário de Santos (CODESP, 2008).

De acordo com Harari et al. (2008) apud Roversi (2012) os ventos mais frequentes da região provêm de leste, de 5 a 10 dias seguidos, e possuem velocidade média de 1,5 m/s. Com a chegada de frentes frias os ventos são provenientes de sul e possuem velocidades superiores (5 a 10 m/s) que duram de 1 a 3 dias.

## 1.2. OBJETIVOS

### **Objetivo Geral**

Avaliar a dinâmica atual do Sistema Estuarino de Santos e realizar um prognóstico do comportamento hidráulico sob cenários propostos de aumento do nível do mar.

### **Objetivos Específicos**

- (1) Compreender a dinâmica atual do Sistema Estuarino de Santos;
- (2) Analisar dados coletados na região de interesse;
- (3) Implementar um modelo hidrodinâmico que simule o campo de elevação e correntes no Sistema Estuarino de Santos;
- (4) Calibrar e validar o modelo hidrodinâmico, utilizando dados medidos em campo;
- (5) Utilizar os modelos implementados para testar os efeitos de um possível aumento do nível do mar no Sistema Estuarino de Santos;

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a melhor compreensão da hidrodinâmica na região estudada, dados dados de corrente e nível da água, coletados e disponibilizados pelo Laboratório de Dinâmica Costeira (LDC) do Instituto Oceanográfico da USP, foram analisados neste estudo. Foram analisadas ainda tabelas contendo as informações sobre as constantes harmônicas da região.

Posteriormente, um modelo hidrodinâmico foi implementado na região, com o objetivo de melhor compreender a circulação na região de interesse. O modelo implementado foi avaliado, para verificar se tem a capacidade de representar os padrões observados nos dados medidos e as descrições das bibliografias consultadas. A partir do modelo validado, alguns cenários foram implementados, considerando aumentos no nível do mar e avaliando possíveis consequências na região de interesse.

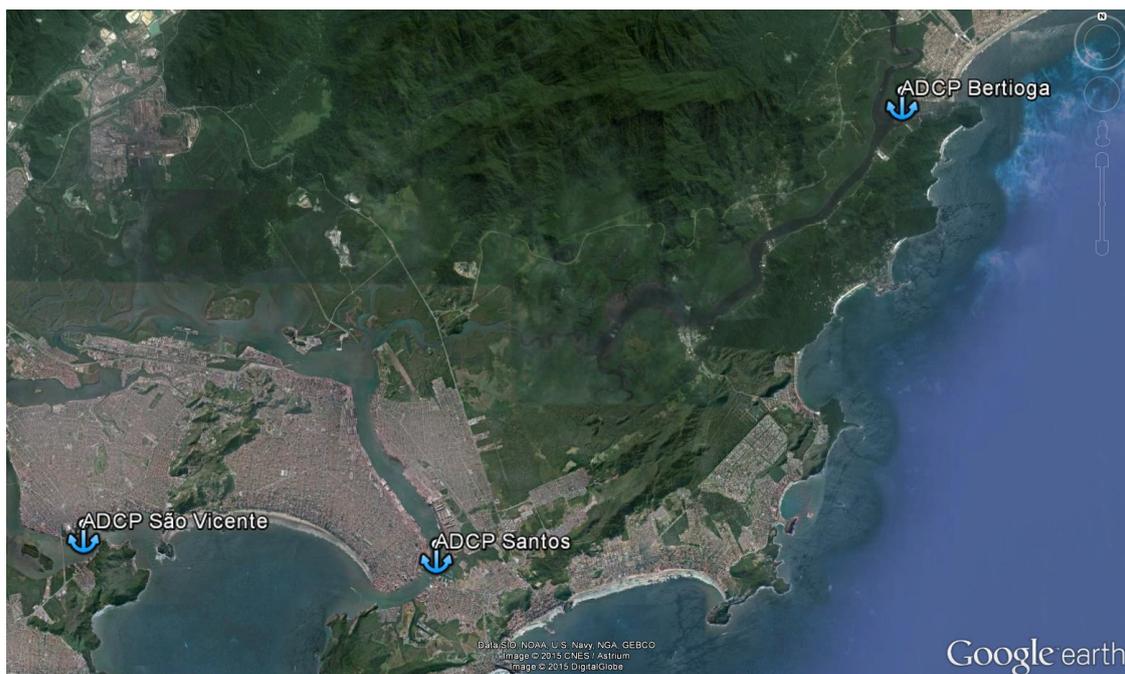
### 2.1. ANÁLISE DOS DADOS

Os dados medidos foram coletados pelo Laboratório de Dinâmica Costeira (LDC) da USP, através de perfiladores acústicos (ADCP – Aquadopp Current Profiler da Nortek de 1 e 2 MHz), fundeados nos três canais de acesso ao Sistema Estuarino de Santos: São Vicente, Santos e Bertioga. A Tabela 1 e a Figura 2 indicam a localização dos ADCPs.

Os dados foram coletados e analisados neste estudo, para o período de junho a julho de 2014.

**Tabela 1** – Localização dos ADCPs fundeados na área de estudo.

Estação	Longitude	Latitude
ADCP São Vicente	46°23'42.52"W	23°58'52.50"S
ADCP Santos	46°17'20.86"W	23°59'13.01"S
ADCP Bertioga	46° 8'57.43"W	23°51'41.49"S



**Figura 2** - Localização dos ADCPs instalados pelo LDC da USP para coleta de dados oceanográficos.

Os instrumentos utilizados medem a velocidade da água por efeito Doppler. Os transdutores emitem feixes de pulsos acústicos em uma frequência constante que é refletida de volta para o aparelho pelas partículas em suspensão na coluna d'água. A diferença de frequência entre os pulsos emitidos e os ecos recebidos é usada para calcular a velocidade relativa entre o instrumento e as partículas em suspensão, fornecendo um perfil de velocidades ao longo da coluna d'água. O equipamento foi configurado para a coleta de direção e intensidade, com intervalo de amostragem de 30 minutos, e células de 0,5 m de profundidade. Com esta configuração, a zona sem dados junto ao fundo é de 0,4 m.

A análise foi realizada em ambiente MATLAB e, para cada um dos três locais onde foram instalados os ADCPs apresenta-se: (1) a elevação do nível do mar e nível médio na forma de séries temporais; (2) o espectro de amplitudes da elevação em função da frequência (em ciclos por dia); (3) as constantes harmônicas extraídas a partir da série temporal de elevação; (4) o número de forma, calculado com base nas constantes harmônicas obtidas; (5) as séries temporais das componentes u e v da corrente para superfície, meia água e

fundo, bem como análises de (6) histogramas direcionais e (7) tabelas de ocorrência conjunta para cada uma das três camadas.

Apresentam-se ainda tabelas de constantes harmônicas da Fundação Estudos do Mar (FEMAR, 2013), contendo as amplitudes e fases de cada componente para as estações maregráficas Porto de Santos e Ilha Barnabé, e o número de forma calculado com base nas constantes harmônicas.

O número de forma pode ser calculado através da equação abaixo (DEFANT, 1960):

$$F = ( K_1 + O_1 ) / ( M_2 + S_2 )$$

onde:

Valor de F	Categoria
0 - 0,25	Semidiurna
0,25 - 1,5	Mista, predominância semidiurna
1,5 - 3	Mista, predominância diurna
> 3	Diurna

## 2.2. MODELAGEM HIDRODINÂMICA

O sistema de modelos Delft3D, através de seu módulo hidrodinâmico Delft3D-FLOW, foi selecionado como ferramenta para se atingir os objetivos propostos neste estudo, com relação à modelagem hidrodinâmica do Sistema Estuarino de Santos.

### 2.2.1. Descrição do Modelo

O sistema de modelos Delft3D (DELTARES, 2013) é capaz de simular a circulação hidrodinâmica como resposta a forçantes baroclínicas e barotrópicas, bem como a transferência de quantidade de movimento ao sistema hidrodinâmico decorrente do sistema de ventos. Além disso, este sistema pode atualizar a cada passo de tempo as cotas batimétricas decorrentes de alterações

geomorfológicas de fundo (erosão e deposição de sedimentos), além do transporte de sedimentos (de fundo e em suspensão na coluna d'água).

A seguir, são descritas as principais características do modelo, através de seu módulo hidrodinâmico.

O Delft3D permite que se trabalhe com grades altamente ajustáveis aos contornos, com uma apurada representação do corpo d'água em estudo. Para a solução do problema dinâmico são consideradas as equações de conservação de massa e quantidade de movimento, além da utilização das aproximações hidrostáticas e de Boussinesq.

A solução do esquema numérico é iniciada pelo mapeamento da geometria do domínio no espaço matemático, a partir da discretização da área no espaço físico. No espaço matemático (regular) são resolvidas as equações de continuidade e conservação da quantidade de movimento. A estrutura vertical, quando ativada na formulação, é determinada por procedimentos explícitos com a especificação dos termos de difusão horizontal.

### Processos Físicos

A implementação do modelo hidrodinâmico foi baseada em um sistema de equações de águas rasas tridimensionais. O sistema de equações consiste nas equações horizontais da quantidade de movimento, na equação de continuidade e nas equações de transporte para constituintes conservativos. Tal conjunto de equações é derivado das equações tridimensionais de Navier-Stokes para um fluido incompressível. A seguir, são descritas as considerações e aproximações do modelo:

- O Delft3D permite que se adote o sistema de coordenadas sigma ( $\sigma$ ) ou coordenadas Z no eixo vertical. A profundidade é assumida como sendo muito menor do que a escala horizontal. Então, devido à reduzida razão de aspecto, as aproximações para o sistema de águas rasas tornam-se válidas e, por conseguinte, a equação vertical do movimento reduz-se à equação hidrostática;

- O efeito da densidade é considerado somente através de seu efeito na pressão (aproximação de Boussinesq);
- Utiliza-se o sistema de coordenadas cartesianas, não considerando o efeito da curvatura da Terra. Além disso, o parâmetro de Coriolis é assumido como uniforme;
- Assume-se uma condição de deslizamento no fundo (*slip boundary condition*) e é aplicada uma formulação de segunda ordem (quadrática) ao cisalhamento no fundo;
- A formulação para a tensão de cisalhamento no fundo devido à ação conjunta das ondas e correntes é baseada num campo de fluxo 2D, gerado a partir da velocidade próxima ao fundo, utilizando uma aproximação logarítmica;
- As equações do Delft3D-FLOW são capazes de resolver as escalas turbulentas (*large eddy simulation*). No entanto, as grades são geralmente muito grosseiras para resolver estas flutuações. Desta forma, as equações utilizadas são baseadas nas tensões de Reynolds;
- No Delft3D-FLOW os vórtices turbulentos são definidos pela profundidade da água. Sua contribuição à troca vertical da quantidade de movimento horizontal e da massa é modelada através de um coeficiente de viscosidade vertical turbulenta e difusividade turbulenta. Assume-se que os coeficientes são proporcionais à escala de velocidade e comprimento. Os coeficientes devem ser especificados (valor constante) ou computados por modelos algébricos, de turbulência k-L ou k- $\epsilon$ , onde k representa a energia cinética turbulenta, L é o máximo comprimento e  $\epsilon$ , a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta;
- Em concordância com a razão de aspecto para consideração da formulação de águas rasas, a geração de turbulência é baseada no gradiente vertical do fluxo horizontal;
- A velocidade em um ponto de grade assume magnitude zero quando a altura da coluna d'água atinge cotas inferiores à metade daquela definida pelo usuário<sup>1</sup>. A velocidade pode retornar a magnitudes diferentes de zero

---

<sup>1</sup> Em geral são utilizadas cotas referenciadas às médias das baixa-mares de sizígia.

quando a altura da coluna d'água atingir valores acima da metade do valor de corte;

- Uma célula é considerada “seca” quando os quatro pontos de velocidade nas extremidades da célula secarem, ou quando a profundidade da água no centro da célula for menor que zero (volume negativo);
- O fluxo de massa através dos contornos laterais e de fundo é nulo;
- Quando não é especificado o campo de temperaturas, a troca de calor com a atmosfera é anulada. A troca de calor através do fundo é nula.
- Se a troca de calor com a superfície da água é computada, utilizando um modelo de temperatura, o coeficiente de troca é função da temperatura e da velocidade do vento e, é determinado de acordo com Sweers (1976). Assume-se que a temperatura do ambiente é constante no espaço e pode variar no tempo. Em outras formulações de troca de calor, os fluxos devido à radiação solar, atmosférica e radiação de fundo, convecção e perdas de calor devido à evaporação são modelados separadamente;
- O efeito da precipitação na temperatura da água é representado.

No próximo subitem, são apresentadas as equações básicas que governam o modelo implementado.

### Equações Básicas

O modelo adotado resolve as equações de Navier-Stokes para fluidos incompressíveis, sob a aproximação de águas rasas e de Boussinesq. A aceleração vertical é desprezada na equação da quantidade de movimento vertical, resultando na aproximação hidrostática. Desse modo, a velocidade vertical é calculada através da equação da continuidade.

### O Sistema de Coordenadas Sigma ( $\sigma$ )

O sistema de coordenadas sigma ( $\sigma$ ) foi introduzido em modelos atmosféricos (PHILLIPS, 1957). O eixo vertical consiste em camadas limitadas por planos  $\sigma$ , não exatamente horizontais, que acompanham as variações da

batimetria e do nível d'água. Através dessa representação para o eixo vertical, obtém-se uma feição suavizada para a batimetria (**Error! Reference source not found.**).

O número de camadas é constante em todo o domínio, independentemente da profundidade local. A distribuição da espessura relativa de cada camada  $\sigma$  é usualmente não uniforme. Esta propriedade permite maior resolução nas áreas de interesse, como em regiões superficiais (importante para fluxos devido ao vento e trocas de calor com a atmosfera) e áreas próximas ao fundo (para cálculos de transporte de sedimentos).

O sistema de coordenadas  $\sigma$  é definido como:

$$\sigma = \frac{z - \zeta}{d + \zeta} = \frac{z - \zeta}{H}$$

onde:

- $z$  a coordenada vertical no espaço físico;
- $\zeta$  a elevação do nível d'água, acima do plano de referência ( $z = 0$ );
- $d$  profundidade abaixo do plano de referência;
- $H$  profundidade local total ( $H = d + \zeta$ ).

No sistema de coordenadas  $\sigma$ , a coordenada vertical no fundo é definida como  $\sigma = -1$ , e na superfície como  $\sigma = 0$  (ver **Error! Reference source not found.**). As derivadas parciais no sistema de coordenadas cartesianas são expressas em coordenadas  $\sigma$  após modificações (“regra da cadeia”) e termos adicionais (STELLING & VAN KESTER, 1994).

O domínio de modelagem tridimensional para o fluxo consiste em um plano horizontal de uma área restrita (limitada) composta de contornos abertos e fechados (terra) e vertical (número de camadas). No sistema de coordenadas  $\sigma$  o número de camadas é constante em todos os locais do plano horizontal. Para cada camada vertical, um sistema de equações conservativas é resolvido.

### Equação da Continuidade

A equação da continuidade (homogênea verticalmente) é dada por:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta)U\sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta)V\sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} = Q$$

onde:

$\sqrt{G_{\xi\xi}}$  coeficiente utilizado na transformação de coordenadas curvilíneas para coordenadas retangulares;

$\sqrt{G_{\eta\eta}}$  coeficiente utilizado na transformação de coordenadas curvilíneas para coordenadas retangulares;

$\xi, \eta$  coordenadas no sistema cartesiano;

$U, V$  velocidades médias (na vertical) nas direções  $\xi, \eta$

$Q$  representa as contribuições por unidade de área devido à fonte ou sumidouro de água, precipitação e evaporação:

$$Q = H \int_{-1}^0 (q_{in} - q_{out}) d\sigma + P - E$$

onde:

$q_{in}$  fonte de água por unidade de volume;

$q_{out}$  sumidouro de água por unidade de volume;

$P$  precipitação;

$E$  evaporação.

### Equações da Quantidade de Movimento na Direção Horizontal

As equações da quantidade de movimento, nas direções  $\xi$  e  $\eta$ , são dadas por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d + \zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - fv \\ = -\frac{1}{\rho_o \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_\xi + F_\xi + \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( v_v \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_\xi \end{aligned}$$

e,

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d + \zeta} \frac{\partial v}{\partial \sigma} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} - \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} + fu \\ = -\frac{1}{\rho_o \sqrt{G_{\eta\eta}}} P_\eta + F_\eta + \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( v_v \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_\eta \end{aligned}$$

As variações de densidade são negligenciadas, exceto nos termos que expressam os gradientes de pressões baroclínicas ( $P_\xi$  e  $P_\eta$ ). As forças  $F_\xi$  e  $F_\eta$ , nas equações acima, representam o desequilíbrio horizontal nas tensões de Reynolds, enquanto  $M_\xi$  e  $M_\eta$  representam as contribuições externas (fontes ou sumidouros).

### Velocidades Verticais

A velocidade vertical ( $\omega$ ) é calculada através de uma adaptação da equação da continuidade no sistema de coordenadas  $\sigma$ :

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta)u\sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta)v\sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = H(q_{in} - q_{out})$$

Na superfície o efeito da precipitação e evaporação é levado em conta. A velocidade vertical  $\omega$  é definida nas superfícies  $\sigma$ . A velocidade vertical ( $\omega$ ) é referente ao movimento em  $\sigma$ , e pode ser interpretada como a velocidade associada aos movimentos de subida e descida. As velocidades verticais  $w$  (em sua “concepção física”), no sistema de coordenadas cartesianas, não são consideradas nas equações do modelo e são computadas apenas para fins de pós-processamento. Estas velocidades podem ser expressas em função das velocidades horizontais ( $u$  e  $v$ ), profundidade da coluna d’água ( $H$ ), elevação do nível d’água ( $\zeta$ ) e velocidade vertical ( $\omega$ ), de acordo com:

$$w = \omega + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left[ u \sqrt{G_{\eta\eta}} \left( \sigma \frac{\partial H}{\partial \xi} + \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} \right) + v \sqrt{G_{\xi\xi}} \left( \sigma \frac{\partial H}{\partial \eta} + \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} \right) \right] + \left( \sigma \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial \zeta}{\partial t} \right)$$

### Pressão hidrostática

Ao se adotar a aproximação das equações de águas rasas para o sistema em estudo, a equação vertical para a quantidade de movimento é reduzida à equação de pressão hidrostática. As acelerações verticais devido aos efeitos de flutuabilidade, assim como aquelas devidas às rápidas variações da topografia de fundo (batimetria) não são consideradas. Portanto,

$$\frac{\partial P}{\partial \sigma} = -g\rho H$$

Após a integração da equação acima, a pressão hidrostática é dada por:

$$P = P_{atm} + gH \int_{\sigma}^0 \rho(\xi, \eta, \sigma', t) d\sigma'$$

Ao adotar a densidade da água como sendo constante e, considerando-se a pressão atmosférica, para o gradiente de pressão (gradiente de pressão barotrópico) têm-se:

$$\frac{1}{\rho_o \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_{\xi} = \frac{g}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} + \frac{1}{\rho_o \sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial P_{atm}}{\partial \xi}$$

$$\frac{1}{\rho_o \sqrt{G_{\eta\eta}}} P_{\eta} = \frac{g}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} + \frac{1}{\rho_o \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial P_{atm}}{\partial \eta}$$

### Parâmetro de Coriolis

O parâmetro de Coriolis ( $f$ ) depende da latitude geográfica ( $\phi$ ) e da velocidade angular de rotação da Terra ( $\Omega$ ). Portanto,  $f = 2\Omega \sin\phi$

### Tensões de Reynolds

As forças  $F_{\xi}$  e  $F_{\eta}$  nas equações da quantidade de movimento representam o desequilíbrio horizontal nas tensões de Reynolds. As tensões de Reynolds são determinadas usando o conceito de viscosidade turbulenta, e pode ser observada em maiores detalhes em Rodi (1984). Dento deste conceito, as componentes (em cada direção) das tensões de Reynolds são o produto entre o fluxo dependente do coeficiente de viscosidade turbulenta e sua correspondente componente média devido ao tensor raio de deformação.

Considerando águas rasas, o tensor de Reynolds é anisotrópico. O coeficiente horizontal de viscosidade turbulenta ( $\nu_H$ ) é muito maior de que sua

contra parte vertical ( $\nu_V$ ). O coeficiente horizontal de viscosidade turbulenta é assumido como sendo a superposição de três partes:

1. uma parte devido a “turbulência de escala subgrade”;
2. uma parte devido a “turbulência tridimensional (3D)”;
3. uma parte devido a dispersão, para simulações representando

médias na coluna d’água.

Em simulações onde as equações de quantidade de movimento e transporte são médias na coluna d’água, a distribuição da quantidade de movimento e material devido à variação vertical da velocidade horizontal, é denominada dispersão. Como o perfil vertical da velocidade horizontal não é resolvido nas simulações 2D, a dispersão não é simulada. O efeito dispersivo pode ser modelado como o produto do coeficiente de viscosidade e o gradiente de velocidade. O termo dispersivo pode ser estimado pela formulação de Elder.

Se o perfil vertical da velocidade horizontal não se aproximar de um perfil logarítmico (devido à estratificação ou a forçante do vento), recomenda-se utilizar um modelo 3D para o transporte de materiais.

A viscosidade turbulenta na horizontal é principalmente associada à contribuição dos movimentos turbulentos na horizontal e forçantes não resolvíveis na malha horizontal (“turbulência de escala subgrade”) ou por equações de águas rasas com médias de Reynolds. É introduzida a viscosidade turbulenta na horizontal na escala de subgrade ( $\nu_{SGS}$ ) e a viscosidade turbulenta na horizontal ( $\nu_H^{amb}$ ). O Delft3D-FLOW simula os movimentos turbulentos na horizontal (em larga escala) através da metodologia denominada *Horizontal Large Eddy Simulation (HLES)*. O  $\nu_{SGS}$  será computado por um modelo de turbulência.

A viscosidade horizontal do meio, definida pelo usuário é representada pela  $\nu_H^{amb}$ . Conseqüentemente, no Delft3D-FLOW o coeficiente de viscosidade turbulento na horizontal é definido por:

$$\nu_H = \nu_{SGS} + \nu_V + \nu_H^{amb}$$

A parte  $\nu_V$  se refere à turbulência tridimensional e, nas simulações 3D, é computada a partir de um modelo de fechamento turbulento 3D.

Para modelos de fechamento turbulento que respondem apenas ao cisalhamento gerado, é conveniente especificar um coeficiente de mistura vertical de forma a contabilizar outras formas de mistura não resolvíveis, ( $v_V^{amb}$ ). Por isso, além de todos os modelos de fechamento turbulento, no Delft3D-FLOW deve-se especificar uma constante (no espaço e no tempo) que represente o coeficiente de mistura do ambiente (valor referente à viscosidade turbulenta na vertical das equações de quantidade de movimento). Conseqüentemente, o coeficiente de viscosidade turbulenta na vertical é definido por:

$$v_V = v_{mol} + \max(v_{3D}, v_V^{amb})$$

onde  $v_{mol}$  é a viscosidade cinemática da água. A parte  $v_{3D}$  é computada através de um modelo de fechamento turbulento.

A fim de modelar o fluxo secundário em simulações 2D em curvas de rios, o Delft3D-FLOW contém uma formulação para levar em conta o efeito do movimento espiral. Assim, a tensão de cisalhamento na horizontal é estendida considerando um termo adicional.

O sistema de coordenadas  $\sigma$  rotaciona o tensor de cisalhamento em relação ao sistema de coordenadas cartesiano, o que implica na adição de termos adicionais (STELLING & VAN KESTER, 1994). Além disso, o tensor de cisalhamento é redefinido assumindo-se que a escala horizontal é muito maior do que a profundidade (BLUMBERG & MELLOR, 1985). Então, as forças  $F_\xi$  e  $F_\eta$  são utilizadas na forma:

$$F_\xi = \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \tau_{\xi\xi}}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \tau_{\xi\eta}}{\partial \eta}$$

$$F_\eta = \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \tau_{\eta\xi}}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \tau_{\eta\eta}}{\partial \eta}$$

Para fluxos em pequena escala, quando o cisalhamento nos contornos fechados precisar ser levado em conta, os tensores de cisalhamento  $\tau_{\xi\xi}, \tau_{\xi\eta}, \tau_{\eta\xi}, \tau_{\eta\eta}$  são determinados de acordo com as seguintes equações:

$$\tau_{\xi\xi} = \frac{2\nu_H}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \left( \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{\partial u}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \xi} \right)$$

$$\tau_{\xi\eta} = \tau_{\eta\xi} = \nu_H \left\{ \frac{1}{G_{\eta\eta}} \left( \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\partial u}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \eta} \right) + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \left( \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{\partial v}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \xi} \right) \right\}$$

$$\tau_{\eta\eta} = \frac{2\nu_H}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left( \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\partial v}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \eta} \right)$$

Para simular fluxos em larga escala, com grades horizontais grosseiras, quando o cisalhamento nos contornos fechados puder ser negligenciado, as forças  $F_\xi$  e  $F_\eta$  são simplificadas. Os termos de viscosidade horizontal, no Delft-FLOW, são então reduzidos para o operador de Laplace ao longo das linhas da grade:

$$F_\xi = \nu_H \left( \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial^2 u}{\partial \eta^2} \right)$$

$$F_\eta = \nu_H \left( \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial^2 v}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial^2 v}{\partial \eta^2} \right)$$

Onde se assume que a viscosidade turbulenta é constante.

### Equação de Estado

A densidade da água ( $\rho$ ) é uma função da salinidade ( $s$ ) e da temperatura ( $t$ ). O modelo Delft3D utiliza uma relação empírica (ECKART, 1958):

$$\rho = \frac{1000P_o}{\lambda + \alpha_o P_o}$$

onde:

$$\lambda = 1779,5 + 11,25t - 0,0745t^2 - (3,80 + 0,01 t) s$$

$$\alpha_o = 0,6980$$

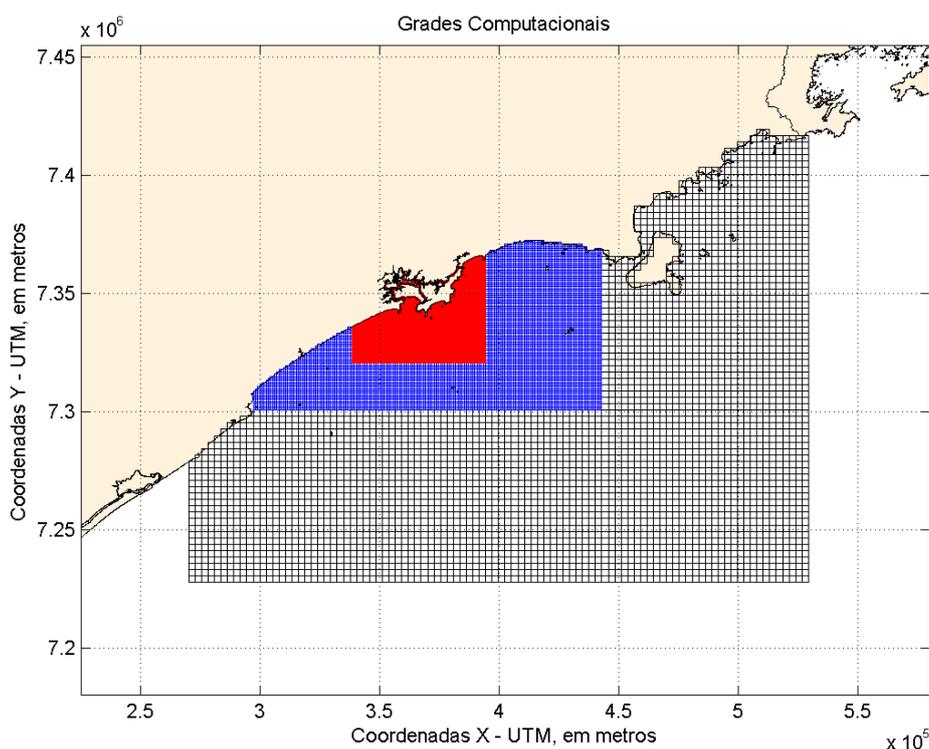
$$P_o = 5890 + 38t - 0,375t^2 + 3s$$

com a salinidade ( $s$ ) em ‰ e a temperatura da água ( $t$ ) em °C.

## 2.2.2. Modelo Implementado

### Grades Computacionais

Com o objetivo de capturar a dinâmica da plataforma continental, mas também representar a região estuarina de forma detalhada, o modelo foi decomposto em 3 grades hidrodinâmicas. A Figura 3 apresenta as três grades computacionais implementadas, através do módulo RGFRID do Delft3D, e a Tabela 2 apresenta as dimensões e resolução de cada uma das grades.

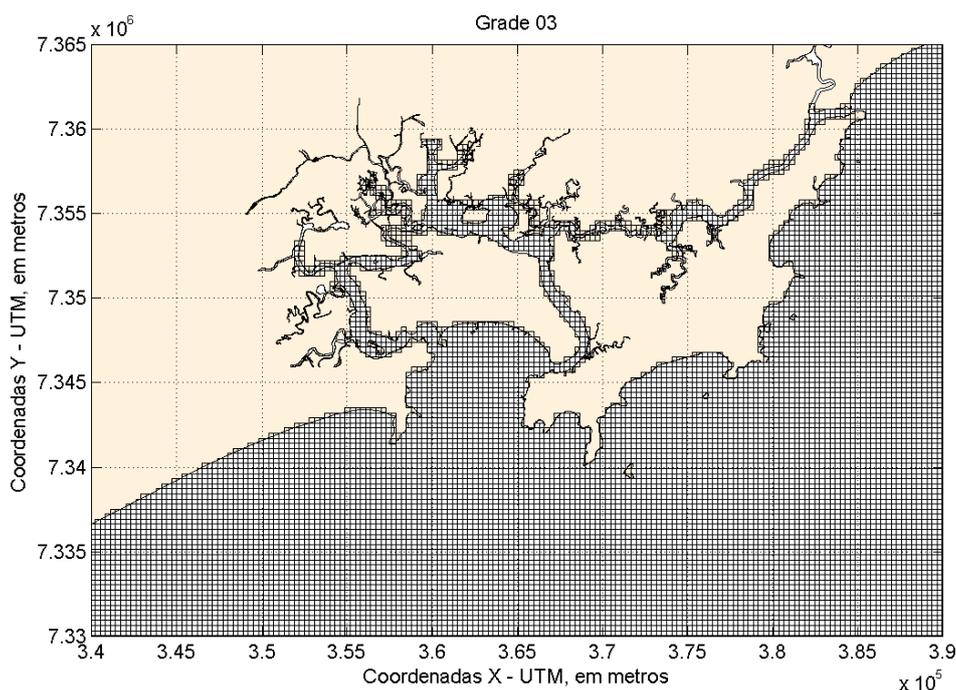


**Figura 3** - Grades computacionais utilizadas na modelagem hidrodinâmica.

As condições de contorno são implementadas na grade mais externa (grade preta, Figura 3), de menor resolução. Esta transmite os resultados para a grade intermediária (azul), que por sua vez se comunica com a grade interna

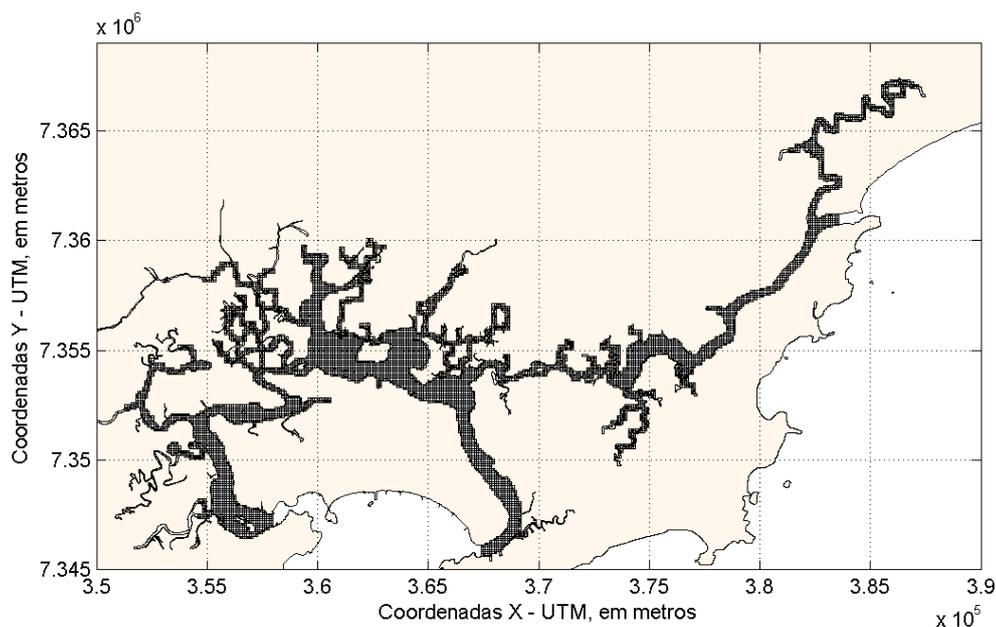
(vermelha), localizada na região de interesse e que apresenta a maior resolução. A Figura 4 apresenta em detalhe a grade mais resolvida.

É importante ressaltar que as três grades rodam simultaneamente, transmitindo os resultados de uma para a outra a cada passo de tempo. No Delft3D esta funcionalidade denomina-se *Domain Decomposition (DD)*, uma técnica na qual o modelo é dividido em diversos domínios, havendo comunicação entre os domínios através de contornos internos denominados *DD-boundaries*.



**Figura 4** - Detalhe da grade apresentada em vermelho na Figura 3.

Uma quarta grade, de maior resolução, foi implementada na região do Estuário de Santos, visando representar de forma mais detalhada a dinâmica estuarina (Figura 5). A Grade 04 possui dimensão de 361 x 219 pontos e resolução de 100 metros (Tabela 2).



**Figura 5** - Grade 04 implementada para representar a dinâmica do Estuário de Santos.

**Tabela 2** - Dimensões e resolução das grades implementadas.

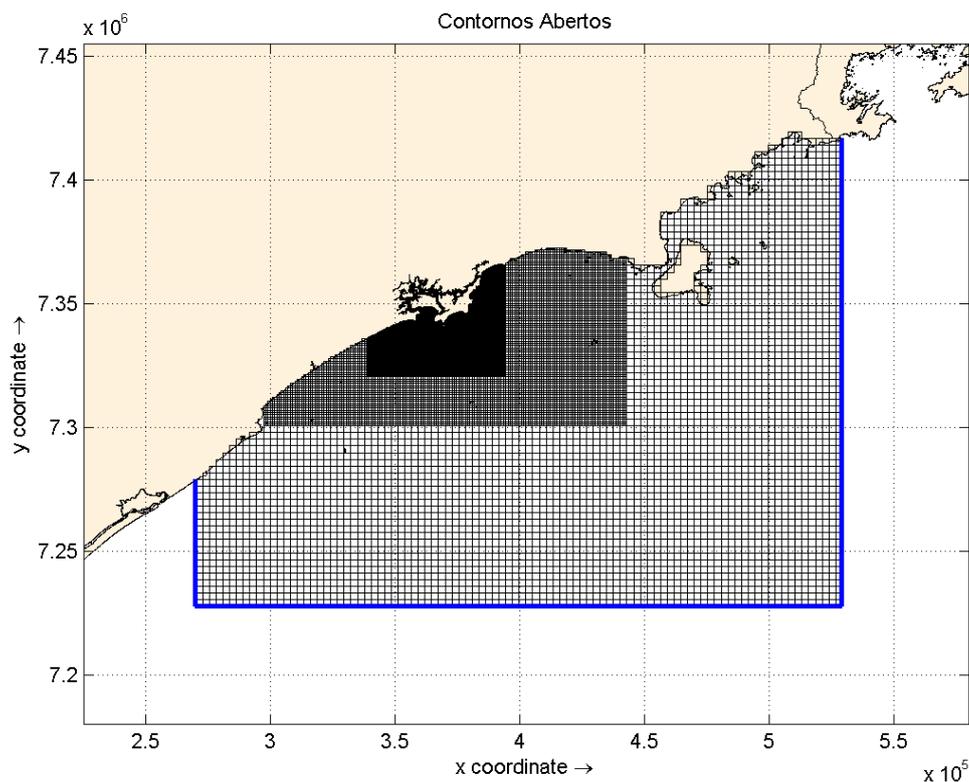
	Dimensões	Resolução (m)
<b>Grade 01</b>	98 x 73	2700
<b>Grade 02</b>	164 x 82	900
<b>Grade 03</b>	188 x 154	300
<b>Grade 04</b>	359 x 217	100

A Grade 04 é forçada com os resultados da Grade 03, utilizando uma funcionalidade do Delft3D denominada *Nesting* (*NESTHD1* e *NESTHD2*). Neste esquema, o usuário indica as duas grades (03 e 04), a localização das bordas abertas da Grade 04 e o tipo de condição que será imposta como forçante. Utilizando estas informações o Delft3D define estações de monitoramento na Grade 03, onde serão salvos resultados que irão ser utilizados para forçar a Grade 04. Depois de rodadas as simulações (com as grades 01, 02 e 03), o Delft3D gera as condições forçantes para a Grade 04 (quase automaticamente).

### Condições de Contorno

As condições de contorno são implementadas ao longo dos 3 contornos abertos da Grade 01 (oeste, sul e leste), como pode ser observado nas bordas

azuis da Figura 6. Foram utilizadas 48 bordas na parte sul, 10 na parte oeste e 35 na parte leste, totalizando 93 bordas abertas.



**Figura 6** - Localização dos contornos abertos na Grade 01 (em azul).

Para forçar o modelo hidrodinâmico utilizou-se uma composição entre constantes harmônicas de maré (extraídas do modelo global TPXO, através do *dashboard* – interface do *Open Earth Tools* do Delft3d) e resultados de corrente e elevação extraídos do modelo HYCOM, impostas na borda do modelo numérico Delft3D através de uma condição de fronteira denominada Riemann. Esse tipo de condição de fronteira é usado para simular uma borda levemente reflexiva. Uma característica de uma fronteira levemente reflexiva é que esta, até um determinado nível, é transparente para onda transmitida, tais como distúrbios de ondas curtas. Assim ondas transmitidas podem cruzar a fronteira aberta, sem serem refletidas de volta para o domínio computacional como acontece com outros tipos de condição de fronteira (DELTARES, 2013).

A condição Riemann imposta na borda do modelo é obtida da seguinte

$$\text{equação: } f(t) = U + \zeta \sqrt{\frac{g}{d}}$$

onde:

- $f(t)$  é a condição Riemann no tempo<sup>2</sup>;
- $U$  é a velocidade da corrente (oriunda do modelo HYCOM) perpendicular à borda.
- $\zeta$  é a elevação do nível da água (oriunda dos modelos TPXO e HYCOM);
- $g$  é a aceleração da gravidade;
- $d$  é a profundidade.

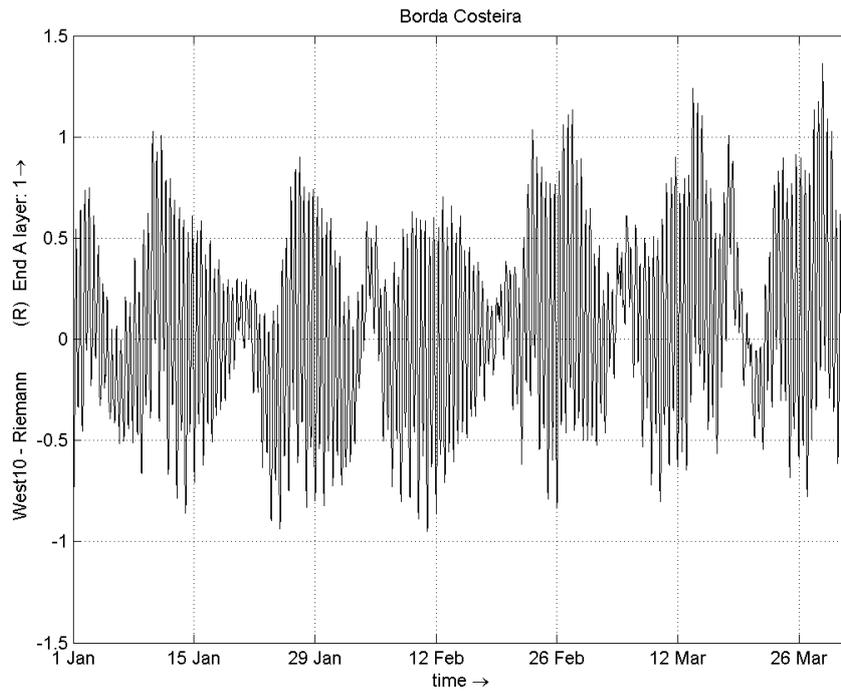
A Figura 7 e a Figura 8 apresentam as séries temporais Riemann inseridas em 2 bordas diferentes do modelo. Conforme citado anteriormente, são consideradas um total de 93 bordas abertas, para cada uma das 10 camadas do modelo, o que resulta em 930 bordas do tipo Riemann forçando a Grade 01. A divisão em diversas bordas permite que o modelo incorpore a dinâmica do modelo de maior escala. Ou seja, a borda é elaborada de acordo com as células do HYCOM que estão próximas a ela, bem como as constantes harmônicas do TPXO referentes àquele ponto.

A Figura 7 ilustra uma série temporal forçante (superficial) em uma borda localizada nas proximidades da costa da Grade 01. A Figura 8 ilustra uma série temporal que força o modelo em uma camada superficial em uma borda localizada nas regiões mais profundas da grade. Pode-se observar que a série temporal localizada na costa possui uma amplitude superior e observa-se maior influência da maré do que das correntes. Já na série temporal mais afastada da costa, a amplitude da série temporal é menor e observa-se uma menor influência da oscilação da maré no sinal.

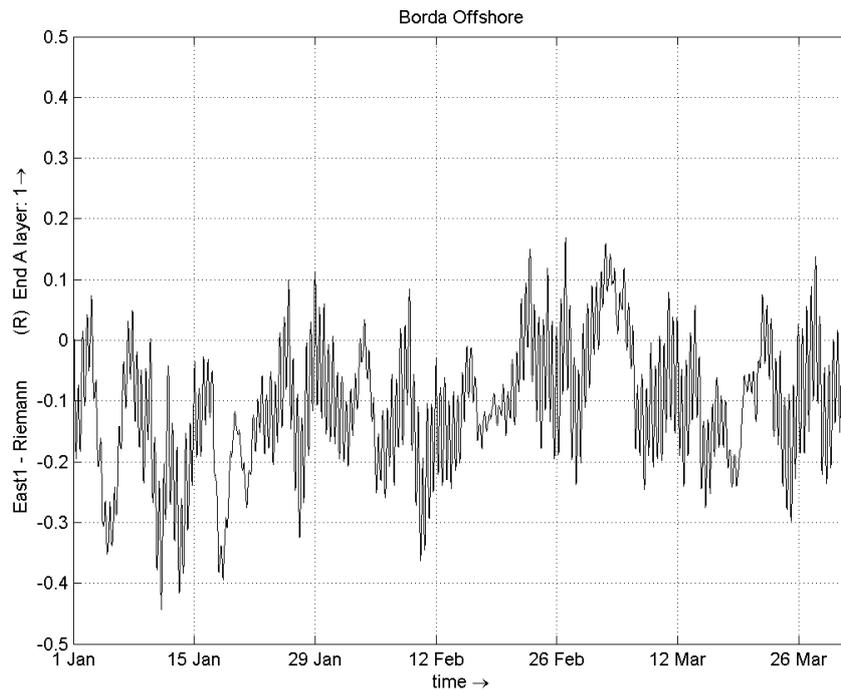
Os resultados do modelo HYCOM permitem que o Delft3D incorpore os sinais de baixa frequência, que podem estar associados a entradas de frentes frias, e que podem levar a um aumento considerável na elevação do nível do mar.

---

<sup>2</sup> O sinal positivo indica que o fluxo entra no domínio e o sinal negativo indica que o fluxo sai do domínio.



**Figura 7** – Série temporal Riemann, utilizada como forçante de uma das bordas superficiais da Grade 02 do modelo hidrodinâmico, nas proximidades da costa.

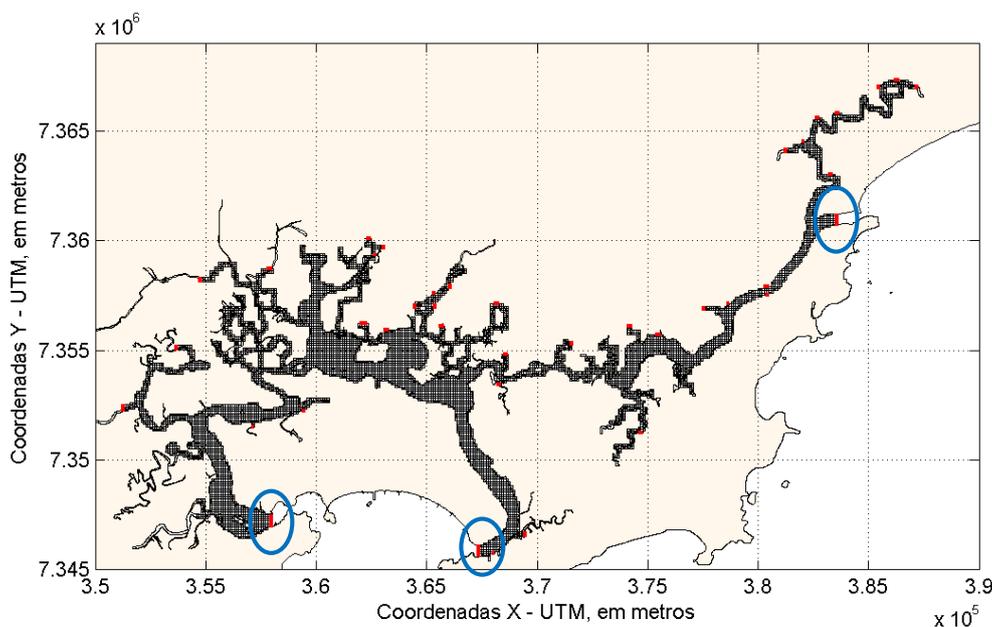


**Figura 8** – Série temporal Riemann, utilizada como forçante de uma das bordas superficiais da Grade 02 do modelo hidrodinâmico, nas regiões mais profundas do modelo.

Adicionalmente, valores médios mensais de vazão de 65 rios são adicionados na região interna da Grade 03, representando os principais contribuintes do Sistema Estuarino.

Conforme descrito no item anterior, a Grade 04 foi forçada com resultados da Grade 03. A Figura 9 indica a localização das bordas abertas (em vermelho), e as bordas geradas a partir dos resultados da Grade 03 contêm um círculo azul. Nas demais 37 bordas foram inseridos os dados de vazão (referentes aos 65 rios).

Os dados de vazão foram obtidos do Estudo de Impacto Ambiental (EIA) de Dragagem de aprofundamento do canal de navegação, bacias de evolução e berços de atracação do Porto Organizado de Santos - São Paulo (CODESP, 2008). Neste estudo as vazões foram estimadas para os cursos d'água que contribuem para o Estuário de Santos, utilizando a metodologia constante do Manual de Cálculo das Vazões Máximas, Médias e Mínimas nas Bacias Hidrográficas do Estado de São Paulo, publicado pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) em 1994 e fórmulas declinadas. Foram utilizados os valores médios mensais disponíveis no EIA para um total de 65 rios e córregos, conforme apresentado na Tabela 3.



**Figura 9** - Localização dos contornos abertos na Grade 04 (em vermelho). As bordas com contorno azul representam as que foram forçadas com resultados da Grade 03.

**Tabela 3 - Vazões médias mensais dos 65 rios e córregos considerados como forçantes do modelo hidrodinâmico.**

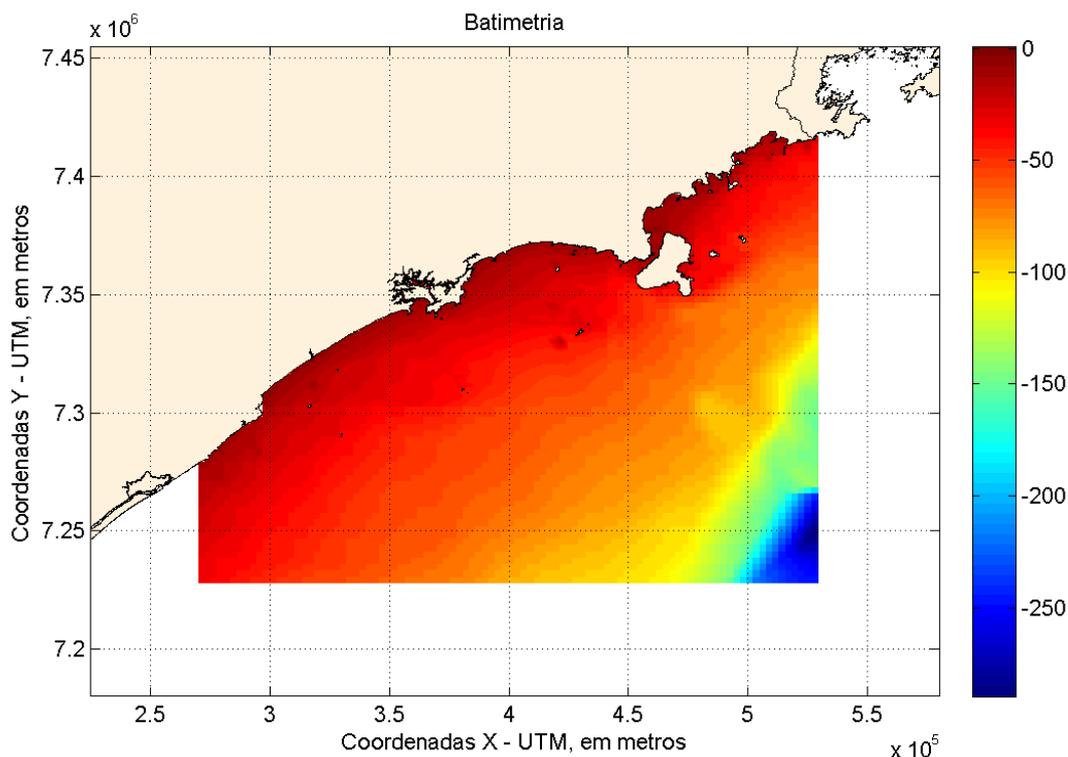
Rio	Vazão Média Janeiro	Vazão Média Fevereiro	Vazão Média Março	Vazão Média Abril	Vazão Média Maio	Vazão Média Junho	Vazão Média Julho	Vazão Média Agosto	Vazão Média Setembro	Vazão Média Outubro	Vazão Média Novembro	Vazão Média Dezembro
Corrego Aracau de Baixo	0.41	0.44	0.51	0.40	0.28	0.21	0.17	0.19	0.22	0.31	0.34	0.37
Corrego Aracau de Cima	0.10	0.11	0.13	0.10	0.07	0.05	0.04	0.05	0.05	0.08	0.08	0.09
Corrego Caiubura	0.09	0.10	0.11	0.09	0.06	0.05	0.04	0.04	0.05	0.07	0.07	0.08
Corrego Canhabura	0.32	0.34	0.39	0.31	0.22	0.16	0.13	0.15	0.17	0.24	0.26	0.29
Corrego da Mãe Maria	0.19	0.20	0.23	0.19	0.13	0.10	0.08	0.09	0.10	0.14	0.15	0.17
Corrego das Neves	0.13	0.13	0.15	0.12	0.09	0.06	0.05	0.06	0.07	0.09	0.10	0.11
Corrego Guaxinduva	0.58	0.62	0.71	0.57	0.40	0.30	0.25	0.27	0.31	0.43	0.47	0.53
Corrego Tapua	0.07	0.07	0.08	0.07	0.05	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.05	0.06
Ribeirao Carambiu	0.46	0.49	0.57	0.45	0.32	0.23	0.19	0.21	0.24	0.34	0.38	0.42
Ribeirão das Furnas	0.49	0.52	0.60	0.48	0.34	0.25	0.21	0.22	0.26	0.36	0.40	0.44
Rio 1	0.26	0.27	0.31	0.25	0.18	0.13	0.11	0.12	0.14	0.19	0.21	0.23
Rio 10	0.06	0.07	0.08	0.06	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.05	0.05	0.06
Rio 11	0.04	0.04	0.05	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04
Rio 12	0.15	0.16	0.19	0.15	0.11	0.08	0.06	0.07	0.08	0.11	0.13	0.14
Rio 13	0.16	0.17	0.20	0.16	0.11	0.08	0.07	0.07	0.08	0.12	0.13	0.14
Rio 14	0.07	0.08	0.09	0.07	0.05	0.04	0.03	0.03	0.04	0.05	0.06	0.06
Rio 15	0.08	0.09	0.10	0.08	0.06	0.04	0.03	0.04	0.04	0.06	0.06	0.07
Rio 16	0.05	0.06	0.07	0.05	0.04	0.03	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04	0.05
Rio 17	0.05	0.05	0.06	0.05	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04	0.04
Rio 18	0.12	0.13	0.15	0.12	0.08	0.06	0.05	0.05	0.06	0.09	0.10	0.11
Rio 19	0.10	0.10	0.12	0.09	0.07	0.05	0.04	0.04	0.05	0.07	0.08	0.09
Rio 2	0.56	0.59	0.68	0.54	0.38	0.28	0.23	0.25	0.29	0.41	0.45	0.50
Rio 20	0.04	0.04	0.05	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04
Rio 21	0.06	0.07	0.08	0.06	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.05	0.05	0.06
Rio 22	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
Rio 23	0.61	0.65	0.74	0.59	0.42	0.31	0.26	0.28	0.32	0.45	0.49	0.55
Rio 24	0.12	0.13	0.15	0.12	0.09	0.06	0.05	0.06	0.07	0.09	0.10	0.11
Rio 25	0.07	0.07	0.08	0.07	0.05	0.04	0.03	0.03	0.04	0.05	0.06	0.06
Rio 26	0.12	0.13	0.15	0.12	0.08	0.06	0.05	0.05	0.06	0.09	0.10	0.11
Rio 27	0.04	0.04	0.05	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04
Rio 28	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
Rio 29	0.07	0.07	0.08	0.06	0.05	0.03	0.03	0.03	0.03	0.05	0.05	0.06
Rio 3	0.47	0.51	0.58	0.46	0.33	0.24	0.20	0.22	0.25	0.35	0.39	0.43
Rio 30	0.04	0.04	0.05	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04
Rio 31	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Rio 32	0.07	0.07	0.08	0.07	0.05	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.06	0.06
Rio 33	0.05	0.05	0.06	0.05	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04	0.04
Rio 34	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01
Rio 35	0.06	0.07	0.08	0.06	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.05	0.05	0.06
Rio 36	0.15	0.16	0.18	0.15	0.10	0.08	0.06	0.07	0.08	0.11	0.12	0.13
Rio 4	0.12	0.13	0.15	0.12	0.08	0.06	0.05	0.05	0.06	0.09	0.10	0.11
Rio 5	1.46	1.56	1.79	1.42	1.00	0.74	0.62	0.67	0.77	1.08	1.19	1.32
Rio 6	0.14	0.15	0.17	0.13	0.09	0.07	0.06	0.06	0.07	0.10	0.11	0.12
Rio 7	0.79	0.84	0.97	0.77	0.54	0.40	0.33	0.36	0.42	0.59	0.64	0.71
Rio 8	0.35	0.38	0.43	0.34	0.24	0.18	0.15	0.16	0.19	0.26	0.29	0.32
Rio 9	0.10	0.11	0.13	0.10	0.07	0.05	0.04	0.05	0.06	0.08	0.09	0.09
Rio Agari	0.56	0.59	0.68	0.54	0.38	0.28	0.23	0.25	0.29	0.41	0.45	0.50
Rio Boturoca	7.03	7.51	8.62	6.86	4.85	3.57	2.97	3.23	3.73	5.23	5.72	6.35
Rio Cabuçu	0.84	0.90	1.03	0.82	0.58	0.43	0.36	0.39	0.45	0.63	0.69	0.76
Rio Cacheta	0.27	0.29	0.33	0.26	0.19	0.14	0.11	0.12	0.14	0.20	0.22	0.24
Rio Crumau	0.90	0.96	1.10	0.88	0.62	0.46	0.38	0.41	0.48	0.67	0.73	0.81
Rio Cubatão	9.73	10.39	11.92	9.49	6.70	4.94	4.11	4.47	5.16	7.24	7.92	8.79
Rio da Praia	0.30	0.32	0.37	0.29	0.21	0.15	0.13	0.14	0.16	0.22	0.24	0.27
Rio dos Bagres	0.57	0.61	0.70	0.56	0.39	0.29	0.24	0.26	0.30	0.42	0.46	0.52
Rio Itapanhau	16.01	17.09	19.62	15.62	11.03	8.13	6.76	7.35	8.48	11.91	13.03	14.46
Rio Itatinga	15.71	16.77	19.25	15.32	10.82	7.98	6.63	7.21	8.32	11.68	12.78	14.19
Rio Jaguareguava	3.70	3.94	4.53	36.04	2.55	1.88	1.56	1.70	1.96	2.75	3.01	3.34
Rio Jurubatuba	5.63	6.01	6.90	5.49	3.88	2.86	2.38	2.58	2.98	4.19	4.58	5.09
Rio Mogi	4.32	4.61	5.29	4.21	2.98	2.19	1.82	1.98	2.29	3.21	3.52	3.90
Rio Pales ou Fazenda	0.38	0.41	0.47	0.37	0.26	0.19	0.16	0.18	0.20	0.29	0.31	0.35
Rio Pereque	2.82	3.01	3.46	2.76	1.95	1.43	1.19	1.30	1.50	2.10	2.30	2.55
Rio Piaçaguera	1.24	1.32	1.52	1.21	0.85	0.63	0.52	0.57	0.66	0.92	1.01	1.12
Rio Quilombo	7.01	7.48	8.59	6.84	4.83	3.56	2.96	3.22	3.72	5.21	5.70	6.33
Rio Tia Maria	0.36	0.38	0.44	0.35	0.25	0.18	0.15	0.16	0.19	0.27	0.29	0.32
Rio Trindade	0.88	0.94	1.08	0.86	0.61	0.45	0.37	0.40	0.47	0.66	0.72	0.80

O modelo foi rodado inicialmente com as forçantes citadas acima e, posteriormente, adicionaram-se as variáveis temperatura e salinidade. A salinidade e a temperatura nas bordas abertas são também provenientes do modelo HYCOM.

Ao considerar as variações horizontais de temperatura e salinidade, o modelo passa a ser “baroclínico”, de modo que existem variações de densidade. As outras rodadas foram todas “barotrópicas”, nas quais a variação da pressão sobre uma superfície horizontal, a uma certa profundidade, é determinada apenas pelo declive da superfície do mar (HARARI, 2015).

### Batimetria

A Figura 10 apresenta a batimetria da região de estudo, interpolada nas grades do modelo através do módulo QUICKIN do Delft3D. As informações são provenientes de cartas náuticas da região, da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN<sup>3</sup>, números 1700 e 23100), de dados fornecidos pela CODESP, dados medidos em campo pelo laboratório de Dinâmica Costeira e pertencentes ao banco de dados da TETRA TECH.



**Figura 10** - Batimetria interpolada às grades computacionais. A escala de cores apresenta o valor em metros.

<sup>3</sup> <https://www.mar.mil.br/dhn/chm/cartas/cartas.html>

### 2.2.3. Avaliação do Modelo Implementado (Validação)

A comparação entre os resultados da modelagem e os dados foi quantificada através dos seguintes parâmetros:

1. Relative Mean Absolute Error (RMAE) (WALSTRA et al., 2001) este parâmetro estatístico é útil para comparação do vetor velocidade levando em consideração a intensidade e a direção.

$$RMAE = \frac{\sum_{i=1}^n |dado_i - modelo_i|}{\sum_{i=1}^n |dado_i|}$$

O RMAE ideal é nulo. Walstra et al. (2001), apresentam também, uma tabela na qual classificam (qualificam) os valores dos erros, reproduzimos esta qualificação na Tabela 4.

**Tabela 4 - Classificação do RMAE por ranges.**

ERRO PERCENTUAL (RMAE) (%)	QUALIFICAÇÃO
RMAE < 20	Excelente
20 < RMAE < 40	Bom
40 < RMAE < 70	Razoável
70 < RMAE < 100	Ruim
RMAE > 100	Péssimo

2. Erro Estatístico Absoluto Médio (*Absolute Mean Error Statistic*). O erro estatístico absoluto médio é definido como (EPA, 2000, WILLMOTT, 1982):

$$E_{abs} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |dado_i - modelo_i|$$

O erro estatístico absoluto médio é o desvio médio entre o previsto pelo modelo e o observado nos dados. O desvio médio ideal é zero. O erro estatístico absoluto tem a mesma dimensão física (unidade) do dado.

3. Raiz do Erro Médio Quadrático (*Root-Mean-Square Error Statistic*).

A raiz do erro médio quadrático é definida como (EPA, 2000, WILLMOTT, 1982):

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (dado_i - modelo_i)^2}$$

A raiz do erro médio quadrático é um indicador do desvio entre o previsto pelo modelo e as observações assim como o desvio médio, contudo é em geral maior do que ele. A raiz do erro médio quadrático ideal é nula. A raiz do erro médio quadrático tem a mesma dimensão física (unidade) do dado.

4. Hess & Bosley (1992) propuseram o “*skill parameter*” uma forma de quantificar a capacidade do modelo de reproduzir os dados observados. O “*skill parameter*” é definido por:

$$Skill = 1 - D'$$

O termo  $D'$  é dado pelo erro quadrático médio normalizado pelo range médio do dado:

$$D' = \frac{RMS}{\text{range médio do dado}}$$

O range médio do dado é definido por:

$$\text{range médio} = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n |dado_i - \text{média do dado}|$$

O “*skill parameter*” tem seu valor variando entre 0 e 1 e o valor ideal é 1 (um).

5. Willmott E Wicks (1980 apud WILLMOTT, 1982) propuseram o “*index of agreement*” ( $d$ ) definido por:

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (dado_i - modelo_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|modelo_i - \overline{dado}| + |dado_i - \overline{dado}|)^2} \right]$$

onde:  $\overline{dado}$  = média do dado.

Segundo os autores para valores de  $d \gg 0.5$  a modelagem apresenta uma significativa redução de erros. Portanto o valor ideal de  $d$  é 1 (um).

6. Coeficiente de correlação linear, ou coeficiente de correlação de Pearson, definido por (SPIEGEL & STEPHENS, 1999):

$$R = \frac{\text{cov}(\text{dado}, \text{modelo})}{\sigma_D \sigma_M}$$

onde:

$\text{cov}(\text{dado}, \text{modelo})$  = covariância entre os valores do dado e os do modelo;

$\sigma_D$  = desvio padrão do dado;

$\sigma_M$  = desvio padrão do modelo.

A covariância entre  $x_1$  e  $x_2$  é definida por:

$$\text{cov}(x_1, x_2) = \frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-1} (x_1(t) - \bar{x}_1)(x_2(t) - \bar{x}_2).$$

O desvio padrão  $x$  é definido por:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-1} (x(t) - \bar{x})^2}.$$

O coeficiente de correlação linear é uma medida da dependência linear entre os resultados da modelagem e as observações. O coeficiente de correlação linear ideal, para este caso, é igual a um.

7. Coeficiente de determinação  $R^2$  (WILLMOTT, 1982, SPIEGEL & STEPHENS, 1999) é dado por:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\text{dado}_i - \text{modelo}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\text{dado}_i - \overline{\text{dado}})^2}$$

De um modo geral,  $R^2$  pode ser entendido como uma medida da variância do dado explicada (reproduzida) pelo modelo, uma vez que o  $R^2$  nada mais é do que uma comparação entre o erro do modelo e a variância total dos dados. O  $R^2$  varia entre 0 e 1 o valor ideal é 1 (um).

#### 2.2.4. Cenários IPCC

Conforme discutido anteriormente, Jochen et al. (2015) alertam que os cenários do IPCC são muitas vezes inapropriados e incompletos para o gerenciamento de áreas costeiras pois excluem o potencial de aumentos extremos de nível do mar. No entanto, parte-se da premissa que os cenários do IPCC apresentam o dado disponível mais representativo para se estudar efeitos de um aumento do nível do mar.

O quinto relatório de avaliação do IPCC – AR5 (*Fifth Assessment Report*, CHURCH et al., 2013) estima que entre 1901 e 2010 a taxa de aumento do nível do mar era 1,7 mm/ano (totalizando 0,19 m). No entanto, entre 1993 e 2010 a taxa aumenta para 3,2 mm/ano.

Considerando estas informações, a partir do modelo validado, outros cenários foram implementados, com o intuito de avaliar a dinâmica do Sistema Estuarino de Santos em resposta às projeções realizadas.

O cenário atual, denominado de Cenário 1, refere-se ao modelo apresentado até agora, que utiliza como forçantes os resultados de elevação e correntes do HYCOM, além das componentes harmônicas de maré, e vazões médias mensais; O Cenário 2 considera uma taxa de elevação do nível do mar somada a uma aceleração de 2 mm/ano para este século, atingindo assim 0,5 m de 2000 a 2010; O Cenário 3 considera uma taxa de elevação do nível do mar somada a uma aceleração de 7 mm/ano para este século, atingindo 1,0 m de 2000 a 2010.

Estas taxas de aumento foram inseridas no modelo hidrodinâmico da seguinte forma: os valores de 0,5 e 1,0 m propostos para os cenários 2 e 3 foram somados às séries de elevação do HYCOM, utilizadas para compor a invariante Riemann - forçante dos contornos oceânicos do modelo.

A grade numérica, bem como as informações batimétricas, parâmetros do modelo e forçantes de descargas continentais utilizados foram mantidos idênticos ao do cenário atual, a fim de avaliar apenas as alterações consequentes do aumento do nível do mar.

Dentro desse contexto, avalia-se como o Estuário responde aos aumentos da elevação do nível do mar propostos pelo IPCC. No item a seguir serão apresentados os resultados dos cenários propostos neste estudo.

### 3. RESULTADOS

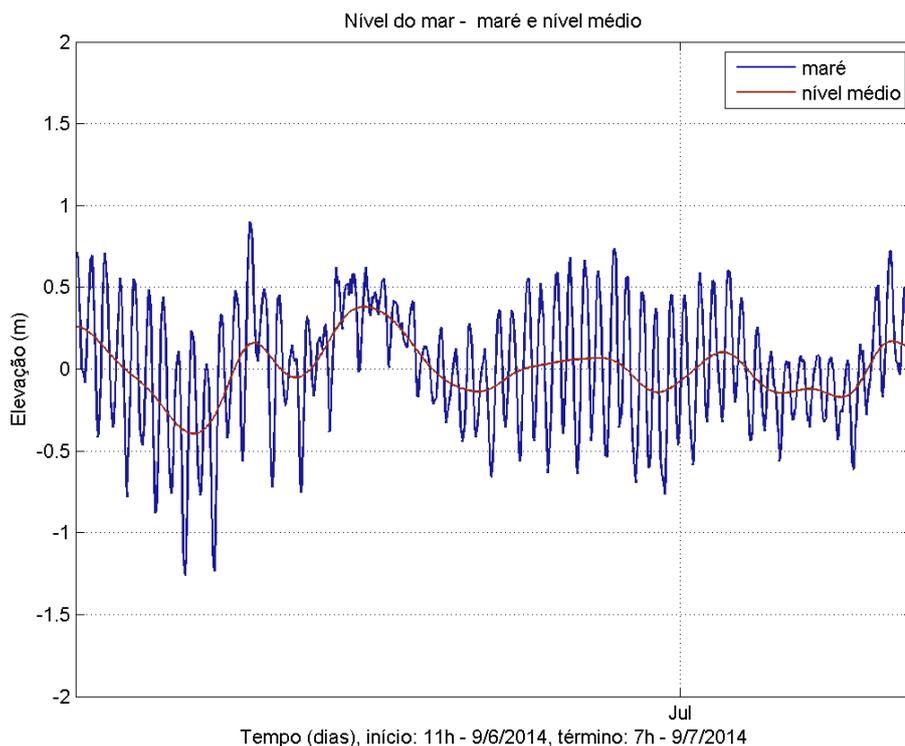
#### 3.1. ANÁLISE DOS DADOS

A seguir é apresentada uma análise dos dados coletados pelo Laboratório de Dinâmica Costeira (LDC) da USP nos canais de (1) Santos, (2) São Vicente e (3) Bertioga, conforme descrição apresentada no item 3.1 deste documento.

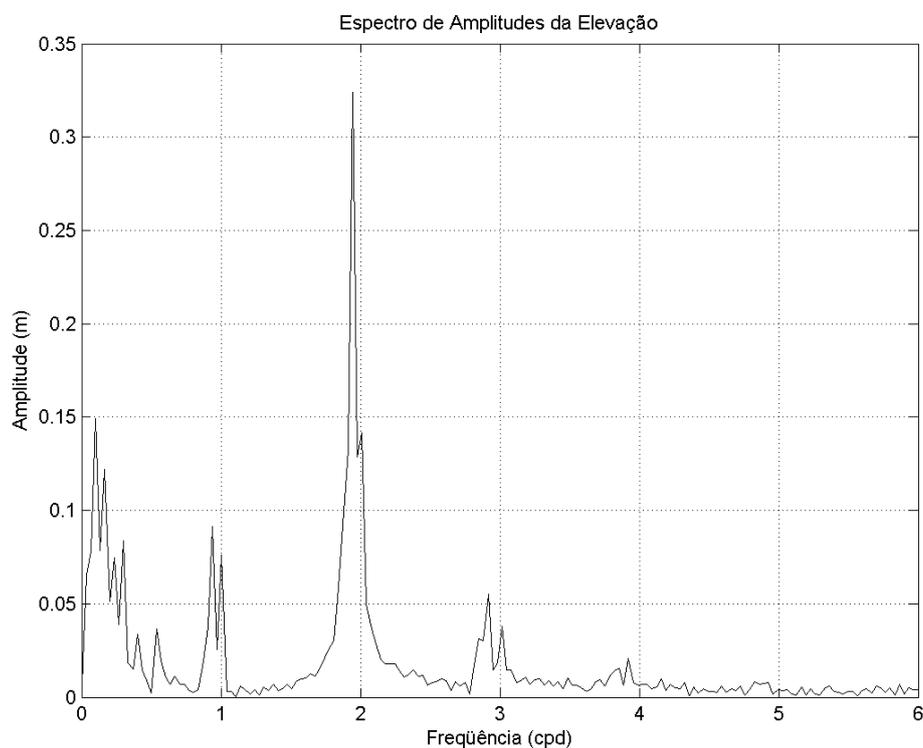
A profundidade local de fundeio dos ADCPs foi de 13,4 metros no ponto de **Santos**, 3,57 m no ADCP de **São Vicente** e de 4,16 m no de **Bertioga**. Vale ressaltar que as primeiras camadas de superfície for excluídas nas análises em virtude das oscilações da superfície d'água implicar em frequentes erros nos ecos recebidos pelo ADCP.

#### Elevação da Superfície do Mar

As medidas de pressão, convertidas para profundidade, fornecem o padrão de variação da superfície do mar. A Figura 11 mostra a série temporal de elevação da superfície do mar, enquanto a Figura 12 apresenta o espectro de amplitudes de elevação em metros e a frequência em ciclos por dia (cpd), para o ponto localizado em **Santos**.

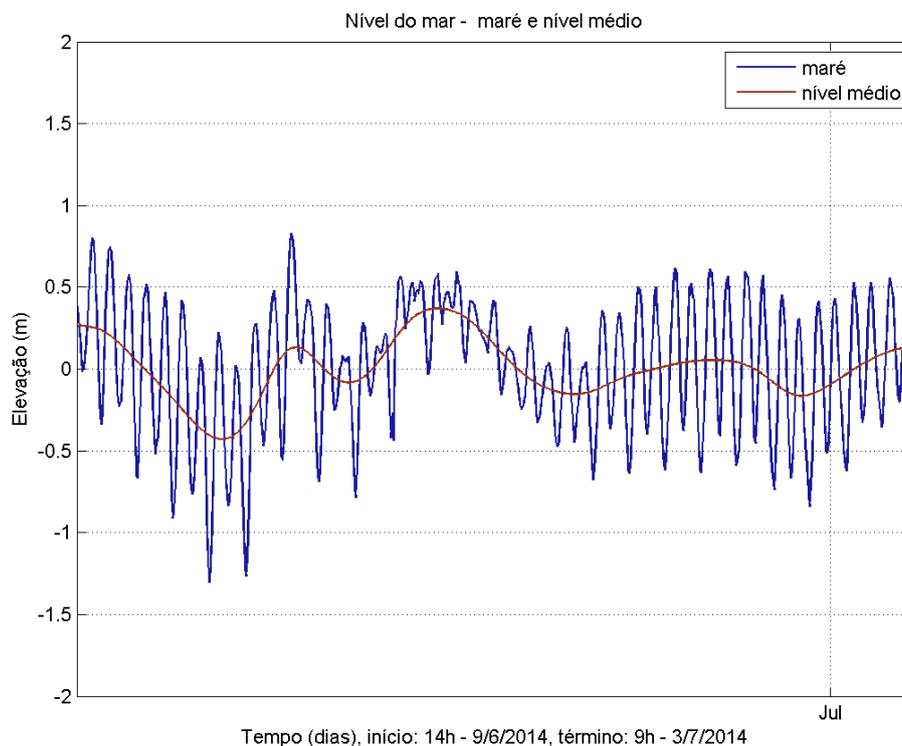


**Figura 11** – Série temporal de elevação da superfície do mar e nível médio (em metros) referente ao ADCP fundeado em Santos.

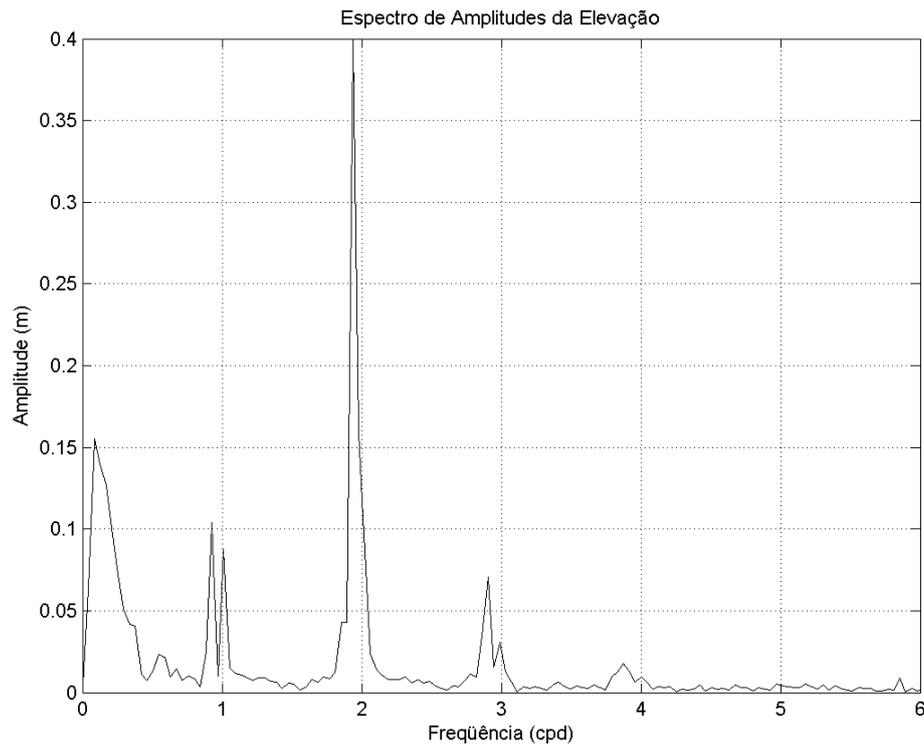


**Figura 12** – Espectro de amplitudes da elevação. O eixo X indica a frequência (em ciclos por dia) e o eixo Y indica a amplitude (em metros) referente à série temporal apresentada na Figura 11.

De forma análoga a Figura 13 apresenta a série temporal de elevação da superfície do mar e a Figura 14 o espectro de amplitudes de elevação para o ponto **São Vicente**.

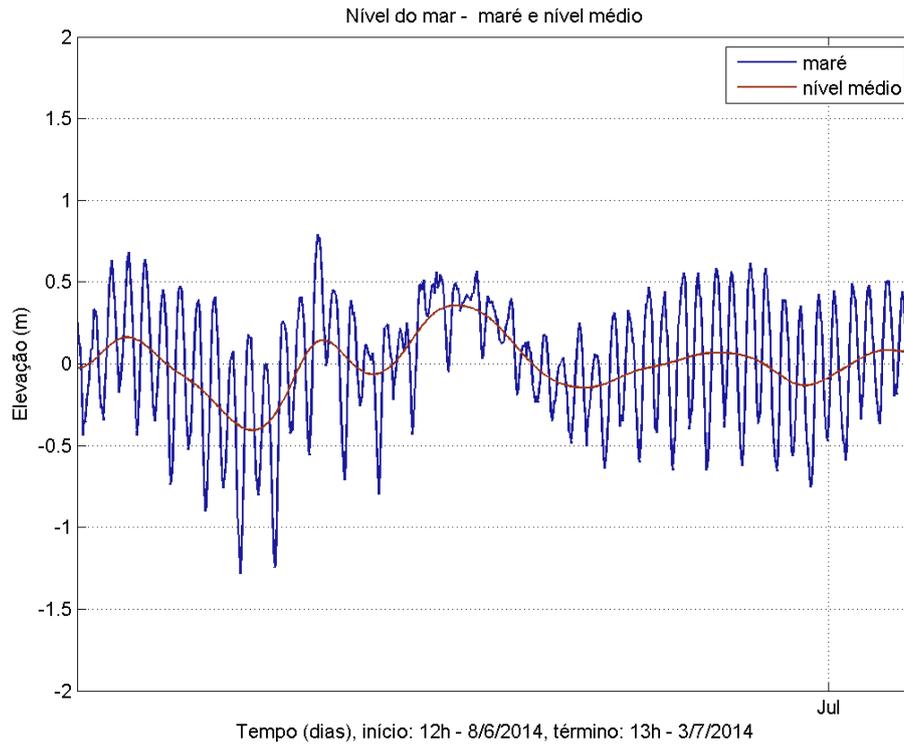


**Figura 13** – Série temporal de elevação da superfície do mar e nível médio (em metros) referente ao ADCP fundeado em São Vicente.

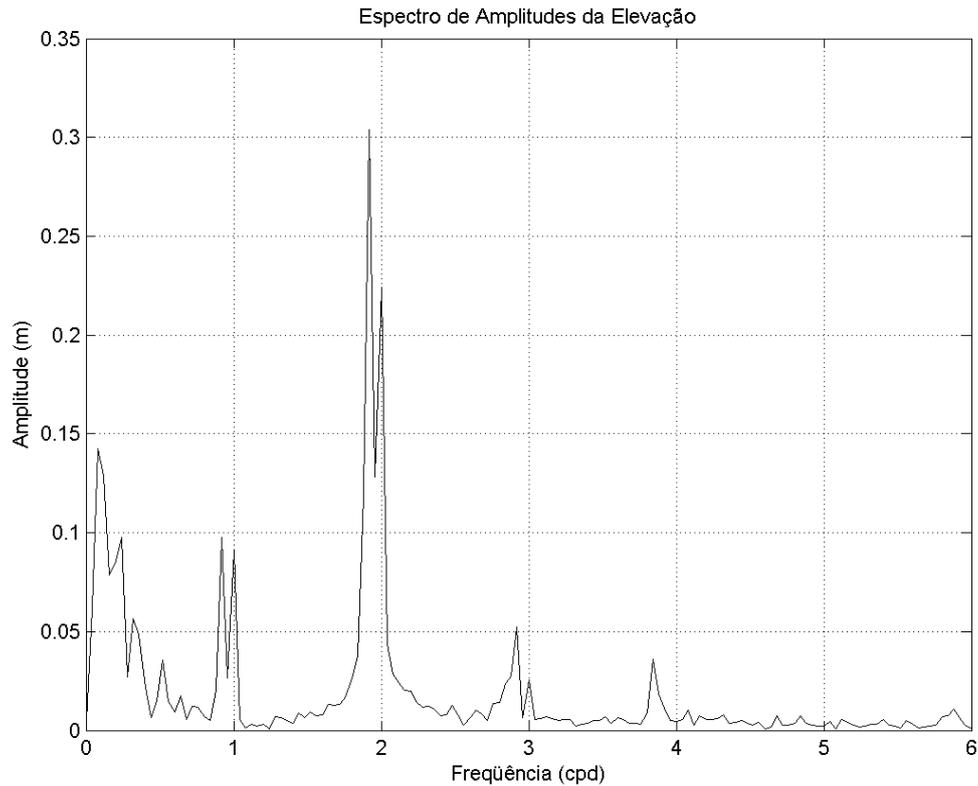


**Figura 14** – Espectro de amplitudes da elevação. O eixo X indica a frequência (em ciclos por dia) e o eixo Y indica a amplitude (em metros) referente à série temporal apresentada na Figura 13.

A Figura 15 mostra a série temporal de elevação da superfície do mar e a Figura 16 apresenta o espectro de amplitudes de elevação para o ponto localizado em **Bertioga**.



**Figura 15** – Série temporal de elevação da superfície do mar e nível médio (em metros) referente ao ADCP fundeado em Bertioga.



**Figura 16** – Espectro de amplitudes da elevação. O eixo X indica a frequência (em ciclos por dia) e o eixo Y indica a amplitude (em metros) referente à série temporal apresentada na Figura 15.

Nos três pontos de coleta podem-se observar os períodos de quadratura e sizígia da maré, de acordo com as diferenças de amplitudes de oscilação do nível do mar devido às forçantes astronômicas. Através das oscilações de baixa frequência no nível médio, observa-se também uma importante contribuição de efeitos atmosféricos, fazendo com que a amplitude varie mais de meio metro. Assim, podem ser observadas oscilações da ordem de 2 metros na superfície do mar, decorrentes da sobreposição de efeitos astronômicos e meteorológicos.

Através da análise dos espectros pode-se observar a predominância das componentes harmônicas semidiurnas, evidenciadas pelo pico na faixa de frequência de 2 ciclos por dia. A presença de amplitudes nas faixas de baixa frequência (abaixo de 1 ciclo por dia), confirma a informação acima, indicando grande contribuição na variação no nível médio decorrente de efeitos atmosféricos.

A partir da série temporal de elevação da superfície do mar, realizou-se uma análise harmônica de marés, através do método de Schuremann (SCHUREMANN, 1941). As constantes harmônicas obtidas para o ponto de **Santos** podem ser visualizadas na Tabela 5, para o ponto de **São Vicente**, na Tabela 6 e para o ponto de **Bertioga**, na Tabela 7.

**Tabela 5** – Constantes harmônicas da maré, extraídas a partir da série temporal de elevação apresentada na Figura 11 (ADCP localizado em Santos).

	Amplitude (cm)	Fase (°)
Q1	3,35	69,57
O1	11,92	72,13
P1	2,21	26,75
K1	10,26	149,83
N2	4,85	139,42
M2	36,98	67,52
S2	26,50	70,35
K2	12,29	64,56
M3	5,91	189,94
MN4	1,06	255,89
M4	1,46	289,26
MS4	1,67	111,14

**Tabela 6** – Constantes harmônicas da maré, extraídas a partir da série temporal de elevação apresentada na Figura 13 (ADCP localizado em São Vicente).

	Amplitude (cm)	Fase (°)
Q1	4,78	64
O1	11,87	64
P1	5,03	2
K1	13,40	151
N2	4,87	140
M2	36,54	59
S2	27,97	49
K2	15,50	33
M3	6,48	172
MN4	0,80	196
M4	1,84	296
MS	0,77	51

**Tabela 7** – Constantes harmônicas da maré, extraídas a partir da série temporal de elevação apresentada na Figura 15 (ADCP localizado em Bertioga).

	Amplitude (cm)	Fase (°)
Q1	3,42	79
O1	11,85	84
P1	2,36	125
K1	7,16	149
N2	4,59	161
M2	35,27	87
S2	23,66	76
K2	13,41	48
M3	4,97	215
MN4	1,55	286
M4	3,29	357
MS4	1,17	89

Através do número de forma, a maré nas três estações pode ser classificada como mista, predominantemente semidiurna (DEFANT, 1960):

F = 0,34938 para Santos;

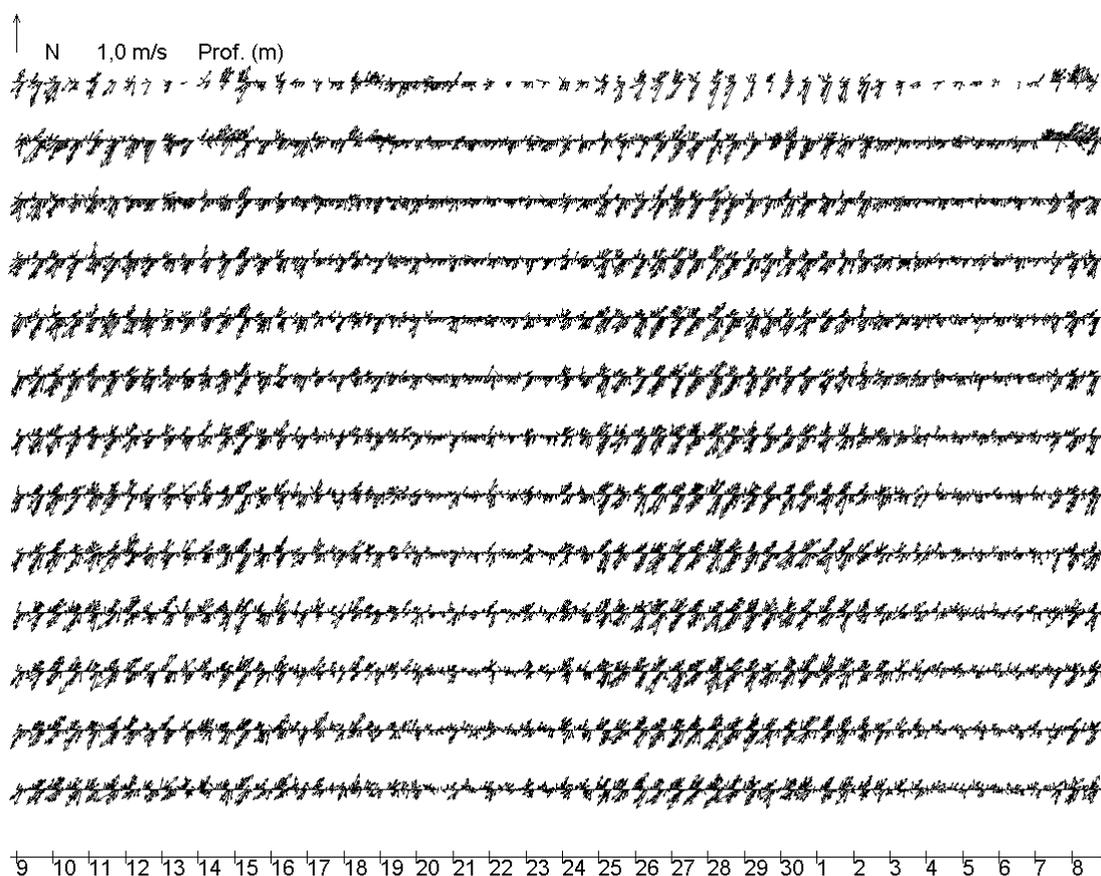
F = 0,39172, para São Vicente;

F = 0,32255, para Bertioga.

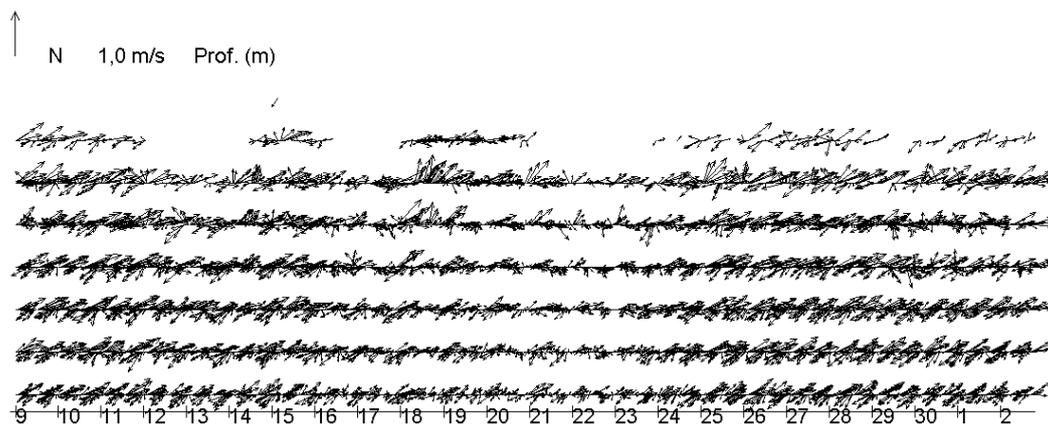
## Correntes

As figuras a seguir ilustram vetores dos dados de velocidade obtidos, fornecendo um padrão da distribuição dos vetores de velocidade ao longo da coluna d'água. A parte superior da figura apresenta a superfície, e a parte inferior a camada de fundo. As camadas mais superiores forem excluídas por apresentarem muitos buracos nos dados.

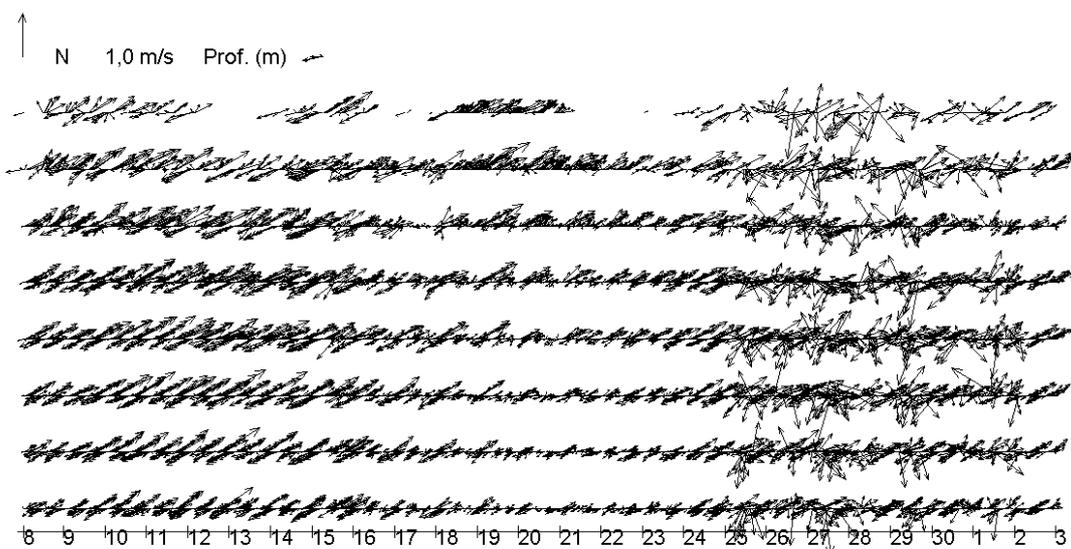
A Figura 17 apresenta os vetores relativos ao ADCP localizado em **Santos**, a Figura 18 refere-se ao ADCP localizado em **São Vicente** e a Figura 19 refere-se ao localizado em **Bertioga**.



**Figura 17** – Vetores de corrente ao longo da coluna d'água para o período de 9 de junho a 9 de julho de 2014, referentes ao ADCP fundeado em Santos. A parte superior da figura ilustra a corrente superficial e, a parte inferior ilustra a corrente no fundo. O tamanho dos vetores é proporcional à velocidade da corrente e a direção do vetor segue a convenção vetorial.



**Figura 18** – Vetores de corrente ao longo da coluna d'água para o período de 9 de junho a 9 de julho de 2014, referentes ao ADCP fundeado em São Vicente. A parte superior da figura ilustra a corrente superficial e, a parte inferior ilustra a corrente no fundo. O tamanho dos vetores é proporcional à velocidade da corrente e a direção do vetor segue a convenção vetorial.

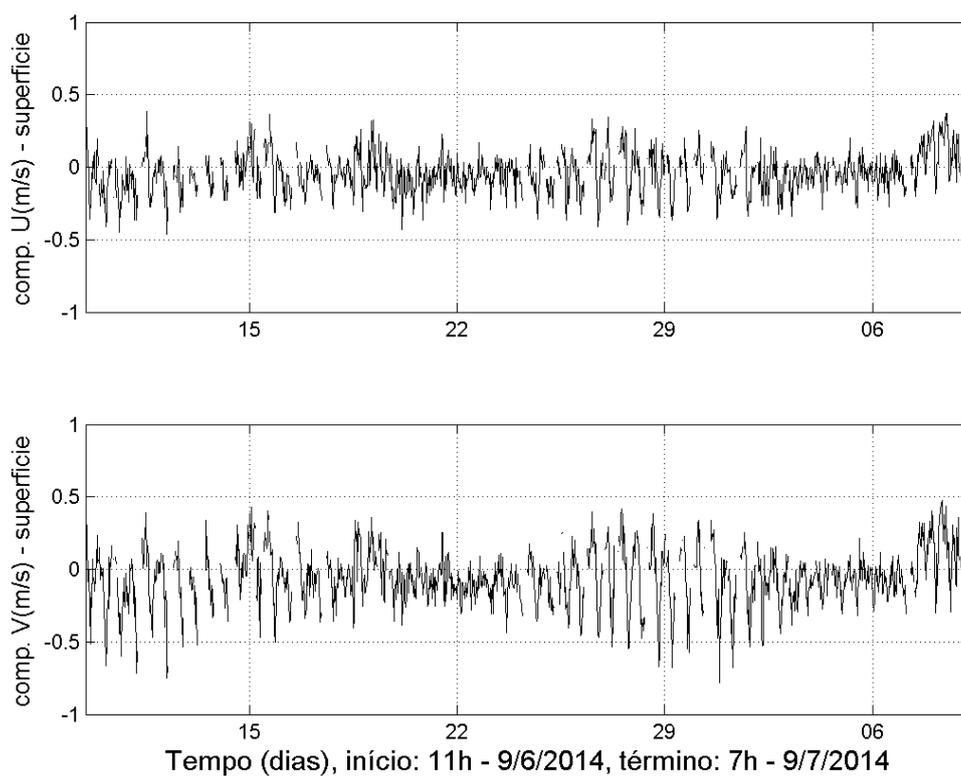


**Figura 19** – Vetores de corrente ao longo da coluna d'água para o período de 9 de junho a 9 de julho de 2014, referentes ao ADCP fundeado em Bertioga. A parte superior da figura ilustra a corrente superficial e, a parte inferior ilustra a corrente no fundo. O tamanho dos vetores é proporcional à velocidade da corrente e a direção do vetor segue a convenção vetorial.

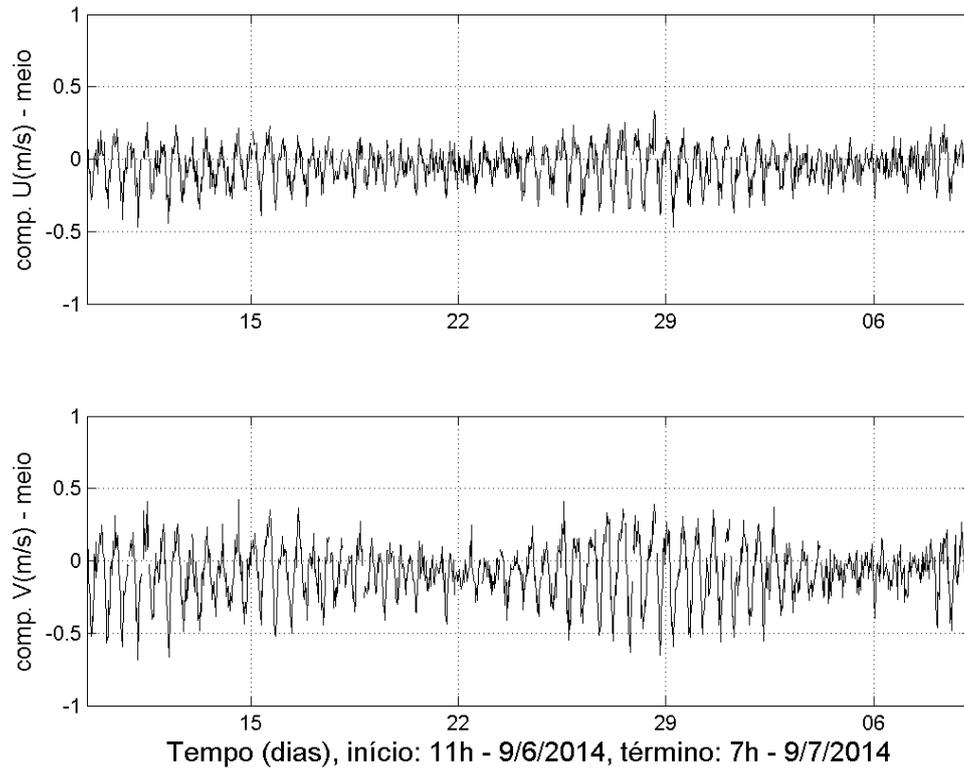
Ao longo do período amostrado é possível notar que as correntes na área de estudo são fortemente influenciadas pela maré, com duas inversões no sentido da corrente por dia. Além disso, observa-se que o padrão de correntes

ao longo da coluna d'água é bastante similar tanto em direção quanto intensidade (barotrópico).

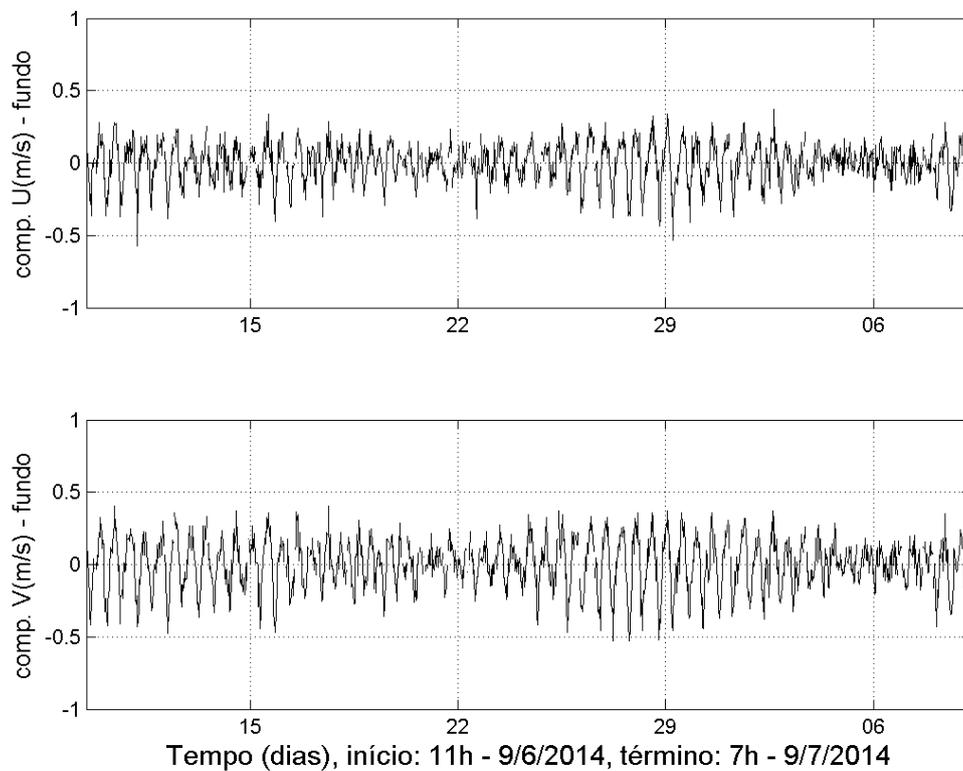
A Figura 20, a Figura 21 e a Figura 22 apresentam as séries temporais das componentes  $u$  (leste-oeste) e  $v$  (norte-sul) da corrente nas camadas superficial, meia água e junto ao fundo, respectivamente, referentes ao ADCP fundeado em **Santos**.



**Figura 20** - Séries temporais das componentes  $u$  e  $v$  da corrente superficial (em m/s), referentes ao ADCP fundeado em Santos.

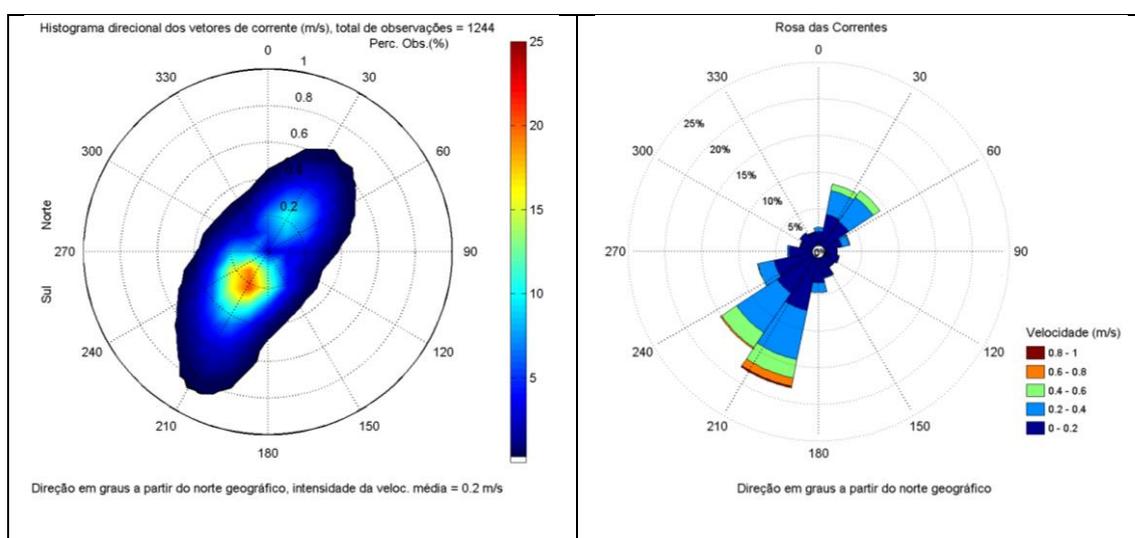


**Figura 21** - Séries temporais das componentes  $u$  e  $v$  em meia água (em m/s), referentes ao ADCP fundeado em Santos.

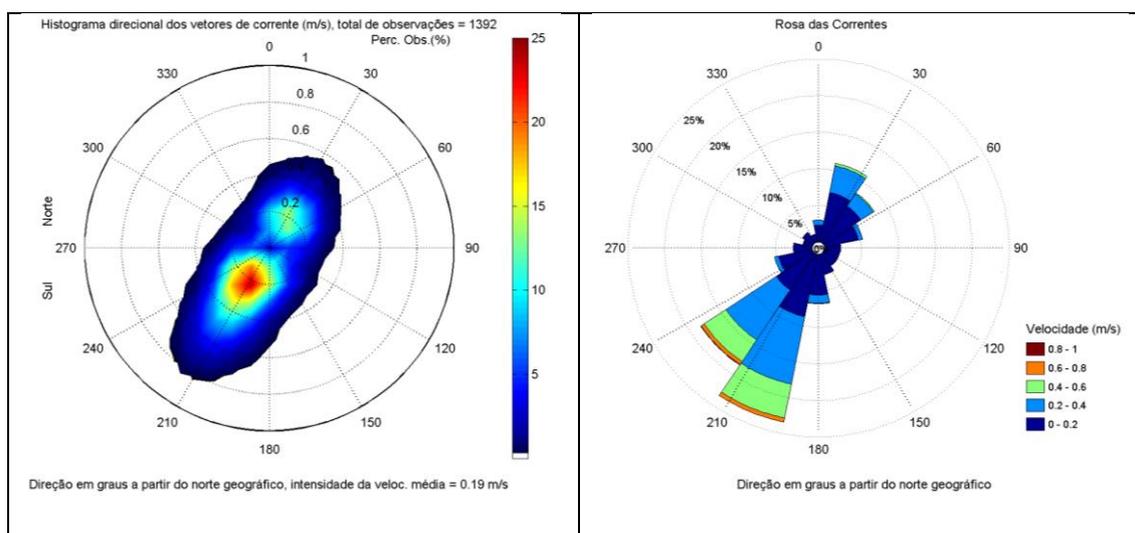


**Figura 22** - Séries temporais das componentes  $u$  e  $v$  no fundo (em m/s), referentes ao ADCP fundeado em Santos.

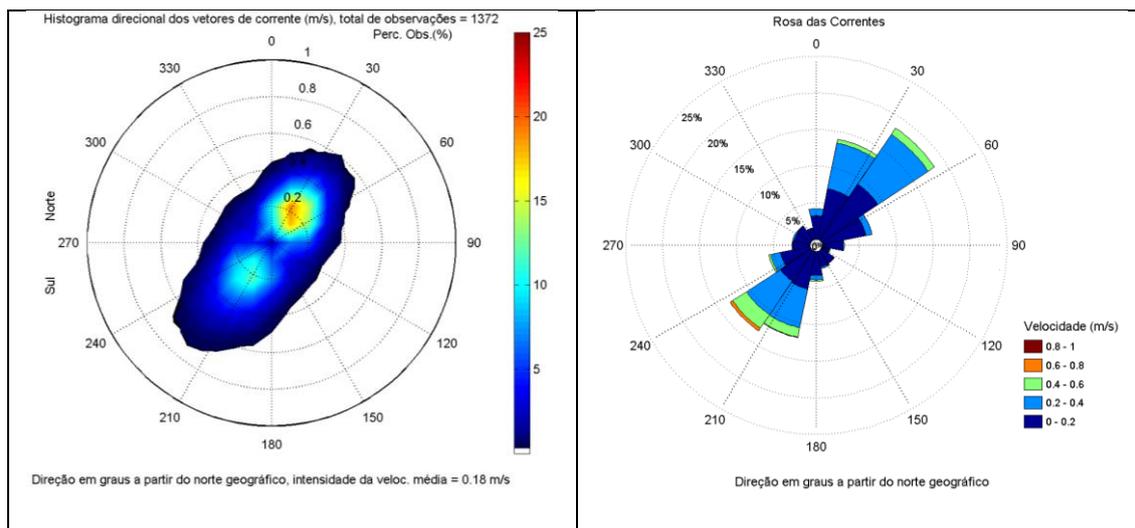
A Figura 23 apresenta o histograma direcional e a rosa de correntes na camada superficial da coluna d'água para o ADCP localizado em **Santos**. No histograma direcional (painel esquerdo) os círculos concêntricos indicam a intensidade da corrente (em m/s), a escala de cores ilustra a porcentagem de observações. Na rosa de correntes as classes de cores indicam a intensidade (em m/s) e os círculos concêntricos a porcentagem de ocorrência. Em ambas formas de apresentação a direção é apresentada em graus a partir do norte geográfico. De forma análoga a Figura 24 apresenta o histograma direcional e a rosa de correntes em meia água e a Figura 25 junto ao fundo.



**Figura 23** – Histograma direcional (painel esquerdo) e rosa de correntes (painel direito) na superfície, referentes ao ADCP fundeado em Santos.



**Figura 24** - Histograma direcional (painel esquerdo) e rosa de correntes (painel direito) em meia água, referentes ao ADCP fundeado em Santos.



**Figura 25** - Histograma direcional (painel esquerdo) e rosa de correntes (painel direito) junto ao fundo, referentes ao ADCP fundeado em Santos.

A tabela de ocorrência conjunta de intensidade e direção da corrente superficial para o ADCP localizado em **Santos** é apresentada na Tabela 8. Para as correntes em meia água a ocorrência conjunta é apresentada na Tabela 9, e para as correntes de fundo na Tabela 10.

**Tabela 8** - Ocorrência conjunta de intensidade (cm/s) e direção (°) da corrente na superfície, referente ao ADCP fundeado em Santos.

Vel (cm/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Total
0-10	0.804	1.929	2.412	1.768	1.447	1.849	1.045	1.849	1.768	2.331	1.527	2.331	2.17	1.688	1.768	1.206	27.894
10-20	1.367	3.055	2.251	0.965	0.402	0.482	0.884	1.286	2.17	6.109	5.305	3.778	1.447	0.322	0.804	0.884	31.511
20-30	0.563	2.492	2.09	0.965	0.08	--	0.08	0.161	1.286	4.662	4.502	2.09	0.322	0.08	--	0.08	19.453
30-40	0.08	1.286	2.492	0.241	--	--	--	--	0.241	3.215	3.055	0.482	--	--	--	--	11.093
40-50	--	0.884	1.125	0.08	--	--	--	--	--	1.527	2.331	0.08	--	--	--	--	6.029
50-60	--	0.161	0.161	--	--	--	--	--	--	1.447	0.482	--	--	--	--	--	2.251
60-70	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.884	0.241	--	--	--	--	--	1.125
70-80	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.402	--	--	--	--	--	--	0.402
80-90	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.241	--	--	--	--	--	--	0.241
<b>Total</b>	2.814	9.807	10.531	4.019	1.929	2.331	2.01	3.296	5.466	20.82	17.444	8.762	3.939	2.09	2.572	2.17	
<b>Vel. Med.</b>	14.878	21.338	22.972	15.025	8.359	7.315	9.145	10.08	15.286	28.22	25.81	15.917	10.125	7.588	8.849	9.984	
<b>Vel. Max.</b>	32.919	56.775	57.199	43.235	25.516	16.148	20.581	23.063	34.482	88.161	63.238	40.551	28.277	22.023	18.793	23.992	

**Tabela 9** - Ocorrência conjunta de intensidade (cm/s) e direção (°) da corrente em meia água, referente ao ADCP fundeado em Santos.

Vel. (cm/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Total
0-10	0.934	2.514	2.299	2.73	1.652	1.652	1.509	1.724	2.658	3.736	2.083	2.011	1.724	1.221	1.437	0.647	30.532
10-20	1.437	4.598	3.951	2.083	0.575	0.503	0.647	1.221	3.089	5.244	4.167	2.802	0.934	0.144	0.359	0.503	32.256
20-30	0.503	2.586	1.652	0.575	--	--	--	--	0.934	5.675	5.46	0.503	--	--	--	--	17.888
30-40	0.216	1.221	0.431	--	--	--	--	--	0.216	3.951	2.945	0.072	--	--	--	--	9.052
40-50	--	0.359	0.072	--	--	--	--	--	0.072	2.73	2.514	--	--	--	--	--	5.747
50-60	--	--	0.072	--	--	--	--	--	--	2.155	1.149	--	--	--	--	--	3.376
60-70	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.359	0.431	--	--	--	--	--	0.79
70-80	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.216	0.072	--	--	--	--	--	0.287
80-90	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.072	--	--	--	--	--	0.072
<b>Total</b>	3.089	11.279	8.477	5.388	2.227	2.155	2.155	2.945	6.968	24.066	18.894	5.388	2.658	1.365	1.796	1.149	
<b>Vel. Med.</b>	14.713	18.264	15.941	10.772	7.552	7.613	8.205	9.37	13.014	27.526	27.598	12.282	8.374	6.724	6.192	9.834	
<b>Vel. Max.</b>	34.532	48.362	51.054	28.559	18.083	13.447	16.421	18.51	41.071	75.683	82.991	37.467	17.729	15.364	15.602	19.922	

**Tabela 10 - Ocorrência conjunta de intensidade (cm/s) e direção (°) da corrente junto ao fundo, referente ao ADCP fundeado em Santos.**

Vel (cm/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Total
0-10	1.603	1.822	2.478	2.77	1.822	0.656	1.531	1.603	1.895	1.895	1.895	2.259	1.676	1.603	1.458	1.02	27.988
10-20	1.749	5.539	7.143	3.499	1.093	0.364	0.583	0.656	1.531	3.571	3.353	2.041	0.802	0.729	0.948	0.656	34.257
20-30	0.875	4.956	5.612	0.875	0.146	0.146	0.073	0.219	0.437	4.082	3.28	0.948	0.073	0.219	0.073	--	22.012
30-40	0.146	1.676	2.915	--	--	--	--	--	0.146	1.531	2.478	0.437	--	--	--	--	9.329
40-50	--	0.583	1.02	--	--	--	--	--	0.219	1.312	1.749	0.292	--	--	--	--	5.175
50-60	--	--	0.073	--	--	--	--	--	--	0.073	0.583	--	--	--	--	--	0.729
60-70	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.073	0.292	--	--	--	--	--	0.364
70-80	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.146	--	--	--	--	--	0.146
<b>Total</b>	4.373	14.577	19.242	7.143	3.061	1.166	2.187	2.478	4.227	12.536	13.776	5.977	2.551	2.551	2.478	1.676	
<b>Vel. Med.</b>	13.754	20.403	21.134	11.657	9.102	9.955	8	9.448	13.208	22.89	26.554	15.799	8.758	9.267	9.416	9.09	
<b>Vel. Max.</b>	33.379	48.223	50.268	27.209	20.84	23.406	21.986	25.959	44.893	62.523	71.772	43.621	21.352	21.467	21.645	19.624	

Através das análises realizadas, no ADCP localizado no ponto de **Santos** observa-se uma corrente que oscila no eixo NE-SW, ou seja, o escoamento é condicionado à orientação do canal neste ponto (Figura 2). Na camada superficial e meia água observa-se uma maior porcentagem de observações de correntes para o quadrante SW e, junto ao fundo, uma maior porcentagem de correntes para o quadrante NE.

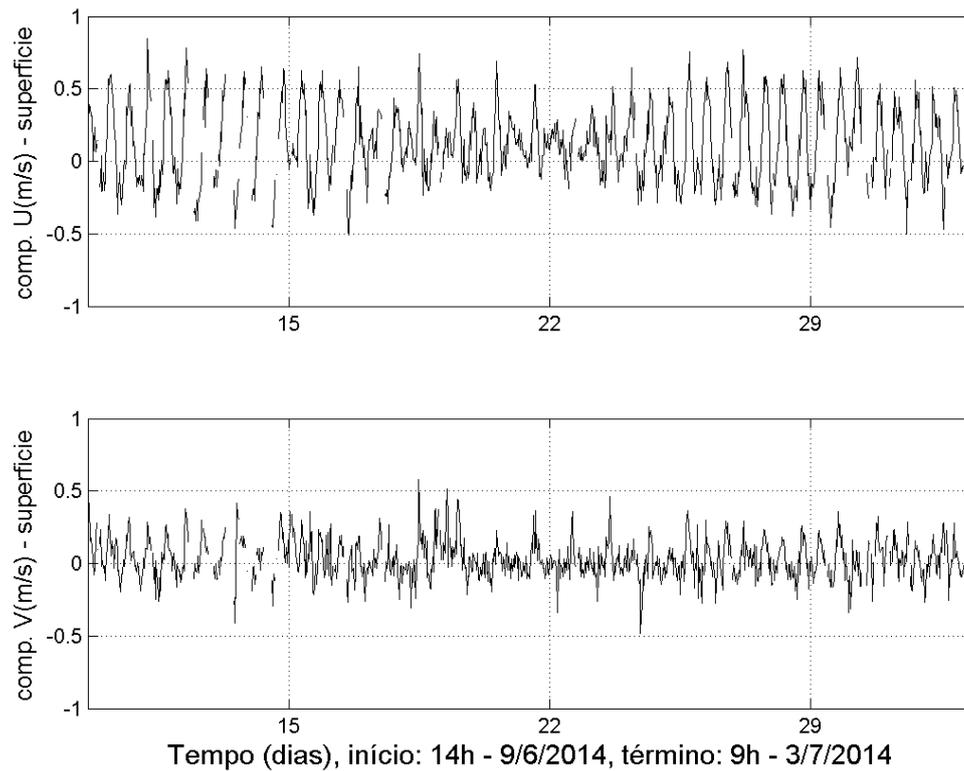
Na superfície as direções SSW, SW e WSW totalizam 47% dos registros, enquanto que as direções NNE, NE e ENE totalizam 24% dos registros. A maior velocidade observada durante o período de medição é de 88 cm/s (SSW), porém também há correntes com velocidades superiores à 50 cm/s das direções SW (máxima de 63 cm/s), NE (57 cm/s) e NNE (56 cm/s). Em 89% das observações a velocidade é inferior à 40 cm/s e a velocidade média oscila entre 7 cm/s (ESE) e 28 cm/s (SSW).

Em meia água as direções SSW, SW e WSW totalizam 48% dos registros, enquanto que as direções NNE, NE e ENE totalizam 25% dos registros. A maior velocidade observada durante o período de medição é de 82 cm/s (SW), porém também há correntes com velocidades superiores à 50 cm/s das direções SSW (máxima de 75 cm/s) e NE (51 cm/s). No entanto, do total de observações em 89% a velocidade é inferior à 40 cm/s e a velocidade média oscila entre 6 cm/s (NW) e 27 cm/s (SW).

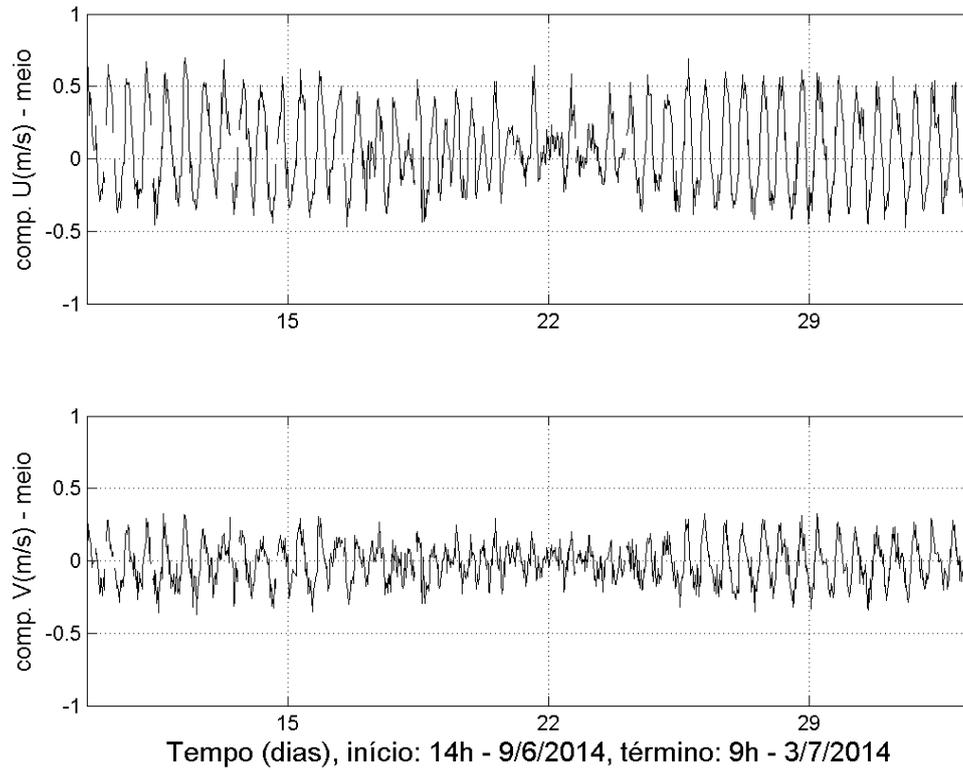
Junto ao fundo as direções NNE, NE e ENE totalizam 40% dos registros, enquanto que as direções SSW, SW e WSW totalizam 32% dos registros. A maior velocidade observada durante o período de medição é de 71 cm/s (SW), porém também há correntes com velocidades superiores à 50 cm/s das direções SSW (máxima de 62 cm/s) e NE (50 cm/s). No entanto, do total de observações

em 93% a velocidade é inferior à 40 cm/s e a velocidade média oscila entre 8 cm/s (SE) e 26 cm/s (SW).

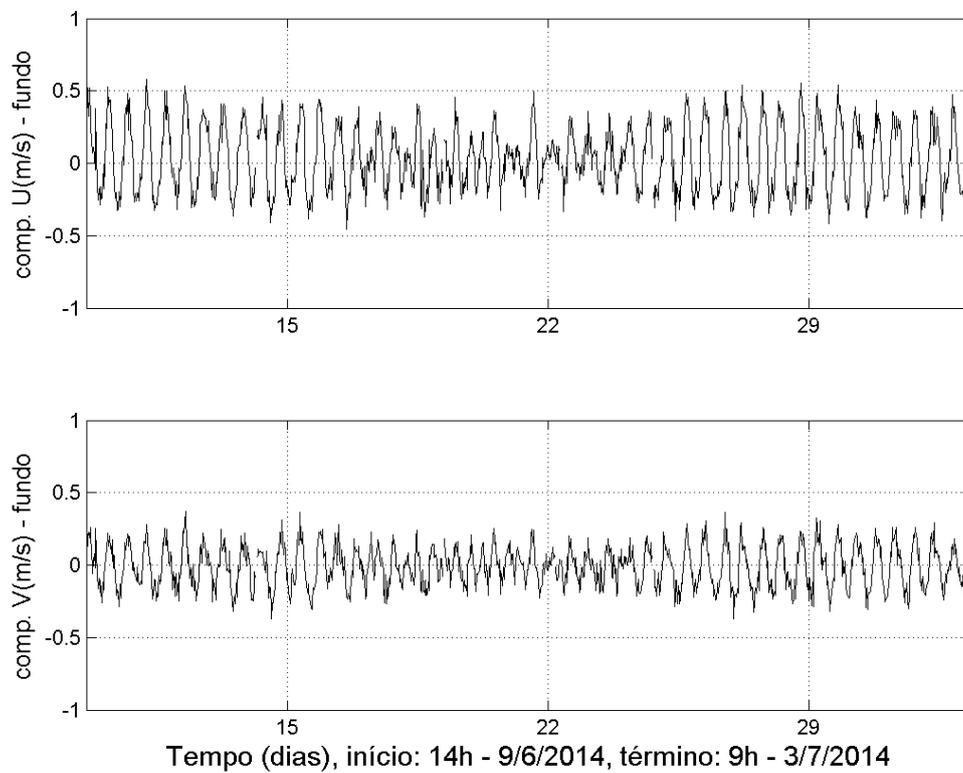
A Figura 26, a Figura 27 e a Figura 28 apresentam as séries temporais das componentes  $u$  e  $v$  da corrente nas camadas superficial, meia água e junto ao fundo, respectivamente, referentes ao ADCP fundeado em **São Vicente**.



**Figura 26** - Séries temporais das componentes  $u$  e  $v$  da corrente superficial (em m/s), referentes ao ADCP fundeado em São Vicente.

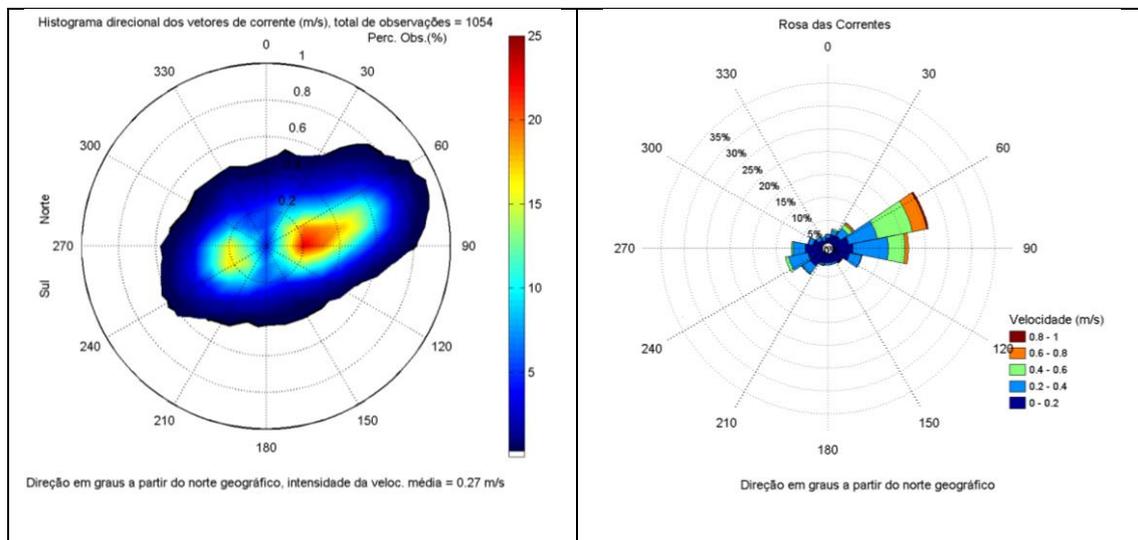


**Figura 27** - Séries temporais das componentes  $u$  e  $v$  em meia água (em m/s), referentes ao ADCP fundeado em São Vicente.

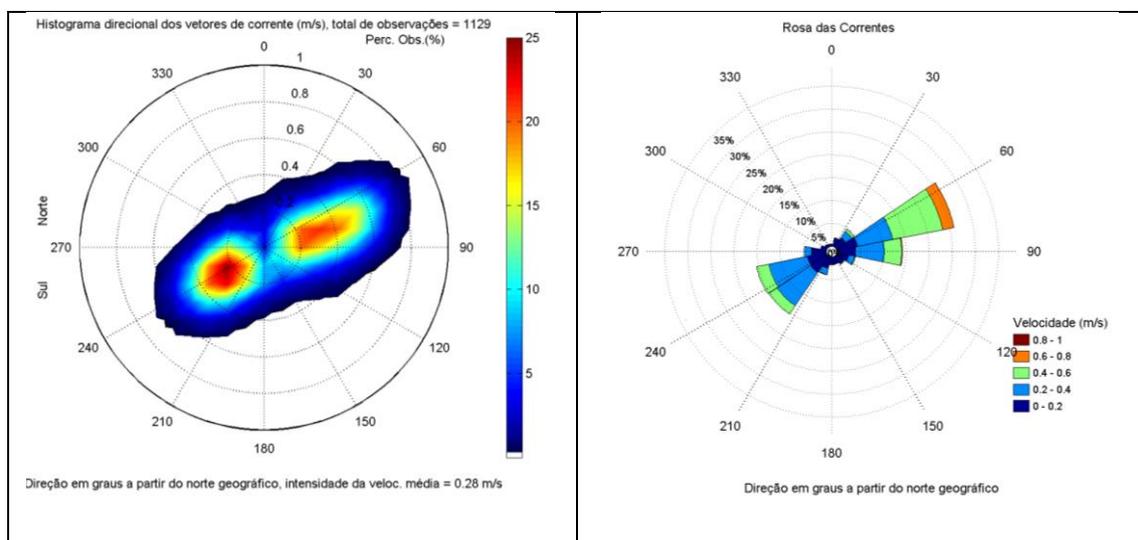


**Figura 28** - Séries temporais das componentes  $u$  e  $v$  no fundo (em m/s), referentes ao ADCP fundeado em São Vicente.

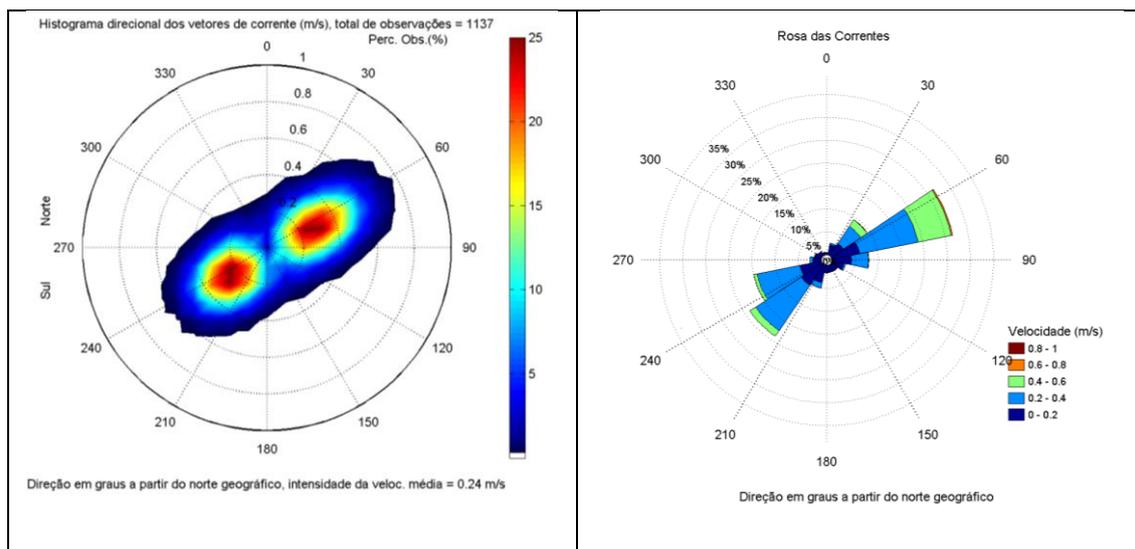
A Figura 29 apresenta o histograma direcional e a rosa de correntes na camada superficial da coluna d'água para o ADCP localizado em **São Vicente**. A Figura 30 apresenta as mesmas análises para meia água, e a Figura 31 para as correntes junto ao fundo.



**Figura 29** – Histograma direcional (painel esquerdo) e rosa de correntes (painel direito) na superfície, referentes ao ADCP fundeado em São Vicente.



**Figura 30** - Histograma direcional (painel esquerdo) e rosa de correntes (painel direito) em meia água, referentes ao ADCP fundeado em São Vicente.



**Figura 31** - Histograma direcional (painel esquerdo) e rosa de correntes (painel direito) junto ao fundo, referentes ao ADCP fundeado em São Vicente.

A tabela de ocorrência conjunta de intensidade e direção da corrente superficial para o ADCP localizado em **São Vicente** é apresentada na Tabela 11. Para as correntes em meia água a ocorrência conjunta é apresentada na Tabela 12, e para as correntes junto ao fundo na Tabela 13.

**Tabela 11** - Ocorrência conjunta de intensidade (cm/s) e direção (°) da corrente na superfície, referente ao ADCP fundeado em São Vicente.

Vel (cm/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Total
0-10	0.474	1.044	0.854	1.044	2.087	1.328	1.328	1.518	0.949	1.233	0.854	1.044	1.423	1.044	0.38	0.095	16.698
10-20	0.664	1.044	1.423	2.657	2.562	2.657	1.328	0.664	1.139	1.139	2.846	2.467	2.657	1.328	0.759	0.569	25.901
20-30	0.569	0.569	1.044	3.7	3.89	1.613	0.095	0.285	0.474	0.474	1.139	3.226	2.372	0.759	0.759	0.569	21.537
30-40	0.285	0.474	1.139	3.131	4.364	1.233	0.095	0.19	0.095	--	1.139	1.423	0.474	0.285	0.095	0.38	14.801
40-50	--	0.38	0.569	3.985	2.562	0.095	0.095	--	--	0.095	0.095	0.569	0.19	--	0.095	--	8.729
50-60	0.095	--	0.569	4.459	1.423	--	--	--	--	--	--	0.19	0.19	0.095	0.095	--	7.116
60-70	--	--	0.38	2.941	0.569	--	--	--	--	--	0.095	--	--	--	--	--	3.985
70-80	--	--	0.095	0.474	0.19	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.759
80-90	--	--	0.095	0.38	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.474
90-100	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<b>Total</b>	2.087	3.51	6.167	22.77	17.647	6.926	2.941	2.657	2.657	2.941	6.167	8.918	7.306	3.51	2.182	1.613	
<b>Vel. Med.</b>	20.37	18.736	30.317	40.558	30.364	19.237	12.301	11.622	13.656	13.638	19.749	23.088	19.516	16.794	19.562	22.314	
<b>Vel. Max.</b>	52.292	49.352	80.572	89.177	72.024	45.105	44.437	34.918	34.482	49.376	62.079	55.919	50.799	54.834	52.921	36.679	

**Tabela 12 - Ocorrência conjunta de intensidade (cm/s) e direção (°) da corrente em meia água, referente ao ADCP fundeado em São Vicente.**

Vel. (cm/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Total
0-10	0.266	1.151	1.063	1.594	0.886	1.329	0.974	0.886	0.886	0.531	1.24	1.24	0.886	0.62	0.62	0.354	14.526
10-20	0.266	0.62	1.417	3.012	3.189	1.329	0.974	0.709	0.797	2.037	3.1	3.012	2.391	0.709	0.089	0.177	23.826
20-30	--	--	1.24	3.189	3.1	0.62	0.177	0.089	0.089	1.24	4.34	4.34	1.24	--	--	--	19.663
30-40	--	0.177	0.443	4.694	3.189	0.709	0.089	--	--	0.177	4.517	4.252	0.266	--	--	--	18.512
40-50	--	--	0.354	5.934	2.214	0.177	--	--	--	0.089	1.949	2.391	--	--	--	--	13.109
50-60	--	--	0.266	5.226	1.594	--	--	--	--	--	0.266	0.354	--	--	--	--	7.706
60-70	--	--	--	1.949	0.177	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	2.126
70-80	--	--	--	0.531	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.531
<b>Total</b>	0.531	1.949	4.783	26.129	14.349	4.163	2.214	1.683	1.771	4.074	15.412	15.589	4.783	1.329	0.709	0.531	
<b>Vel. Med.</b>	8.512	11.195	21.339	38.901	30.407	18.361	11.978	9.778	9.793	17.342	27.339	27.61	16.827	9.259	6.664	8.286	
<b>Vel. Max.</b>	14.76	34.952	57.947	76.122	64.714	44.099	30.042	22.602	21.56	42.512	56.689	52.693	38.851	19.35	13.82	17.535	

**Tabela 13 - Ocorrência conjunta de intensidade (cm/s) e direção (°) da corrente junto ao fundo, referente ao ADCP fundeado em São Vicente.**

Vel (cm/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Total
0-10	0.352	1.143	1.055	1.495	1.583	1.671	1.319	0.88	0.792	1.583	0.967	1.143	0.792	0.967	0.88	0.528	17.15
10-20	0.176	1.143	2.111	4.661	2.639	0.967	0.352	0.616	0.88	2.287	4.485	3.606	1.055	0.616	0.176	0.088	25.858
20-30	--	0.264	2.902	5.893	2.023	0.352	--	0.088	--	1.055	6.596	5.453	0.528	--	--	--	25.154
30-40	--	0.088	1.671	7.036	1.671	--	--	--	--	0.176	5.365	4.046	0.088	--	--	--	20.141
40-50	--	--	1.319	5.717	--	--	--	--	--	--	1.495	0.616	--	--	--	--	9.147
50-60	--	--	0.352	1.671	0.088	--	--	--	--	--	--	0.088	--	--	--	--	2.199
60-70	--	--	0.088	0.264	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.352
<b>Total</b>	0.528	2.639	9.499	26.737	8.004	2.99	1.671	1.583	1.671	5.101	18.909	14.952	2.463	1.583	1.055	0.616	
<b>Vel. Med.</b>	8.723	12.576	26.548	31.164	20.065	10.888	7.698	9.212	10.87	14.447	26.125	24.685	14.214	8.285	6.732	7.524	
<b>Vel. Max.</b>	16.011	31.166	61.491	64.103	54.864	25.006	15.742	21.524	17.837	36.38	49.254	50.215	32.101	19.275	14.938	12.925	

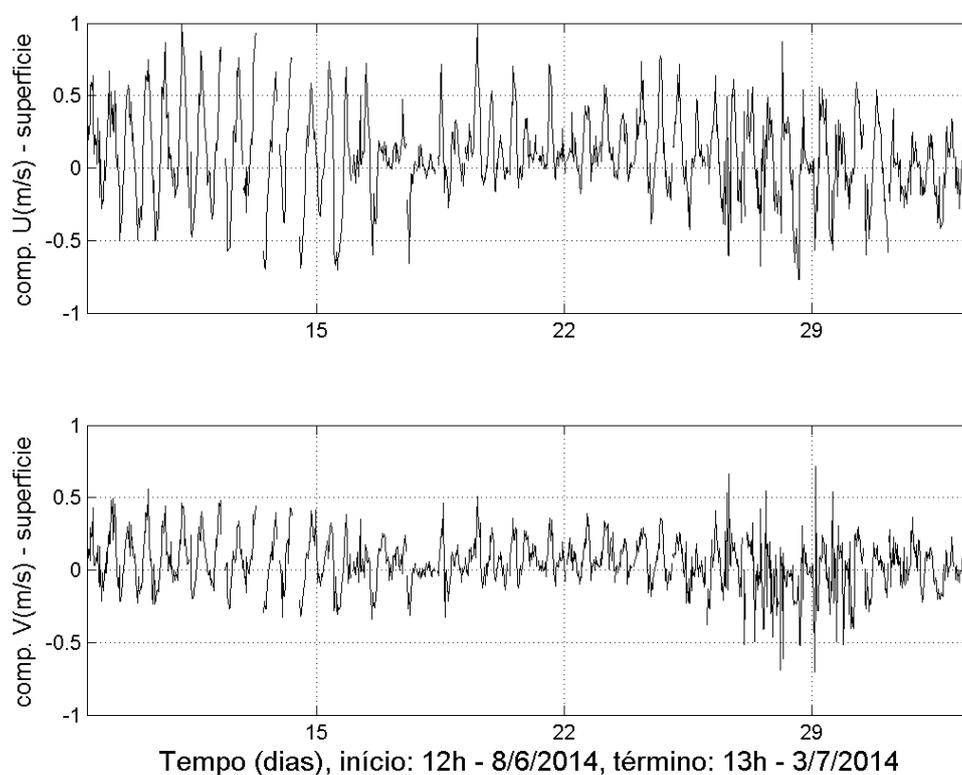
Através das análises realizadas, no ADCP localizado no ponto de **São Vicente**, observa-se uma corrente que oscila no eixo ENE-WSW, seguindo a orientação do canal neste ponto (Figura 2), com uma maior porcentagem de observações no quadrante ENE.

Na superfície as direções ENE, E e NE totalizam 46% dos registros, enquanto que as direções WSW, W e SW totalizam 22% dos registros. A maior velocidade observada durante o período de medição é de 89 cm/s (ENE), porém também há correntes com velocidades superiores à 70 cm/s das direções NE (máxima de 80 cm/s) e E (72 cm/s). Do total de observações em 98% a velocidade da corrente é inferior à 70 cm/s. A velocidade média da corrente oscila entre 11 e 40 cm/s, avaliando todas as classes de direção.

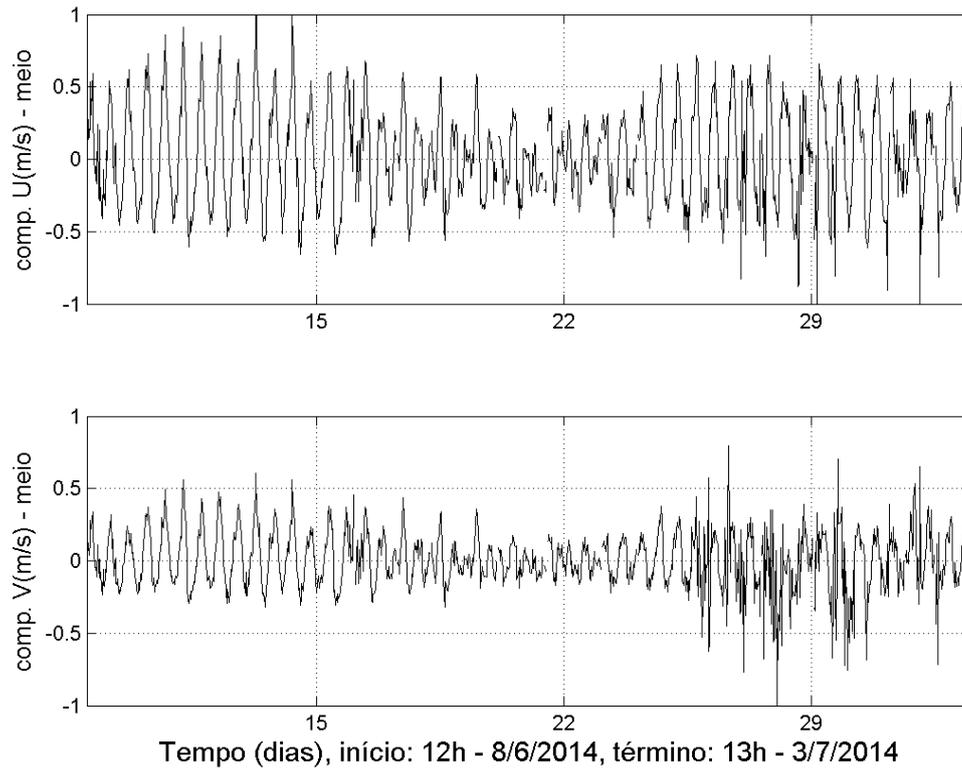
Em meia água 40,478% das observações são referentes aos quadrantes ENE e E e 31% das observações dos quadrantes WSW e SW. A maior velocidade observada durante todo o período é de 76 cm/s (ENE). Observam-se correntes acima de 50 cm/s em 10% dos registros (registros das direções NE, ENE, E, SW e WSW). A velocidade média oscila entre 6 cm/s (NW) e 38 cm/s (ENE).

Junto ao fundo observa-se que: 44% dos registros referentes aos quadrantes ENE, NE e E e 38% dos registros referentes aos quadrantes SW, WSW e SSW. As máximas observadas foram de ENE (64 cm/s) e NE (61 cm/s). Também foram observados registros acima de 50 cm/s dos quadrantes E e WSW. No entanto, do total de observações em 97% a velocidade é inferior à 50 cm/s e a velocidade média oscila entre 6 cm/s (NW) e 31 cm/s (ENE).

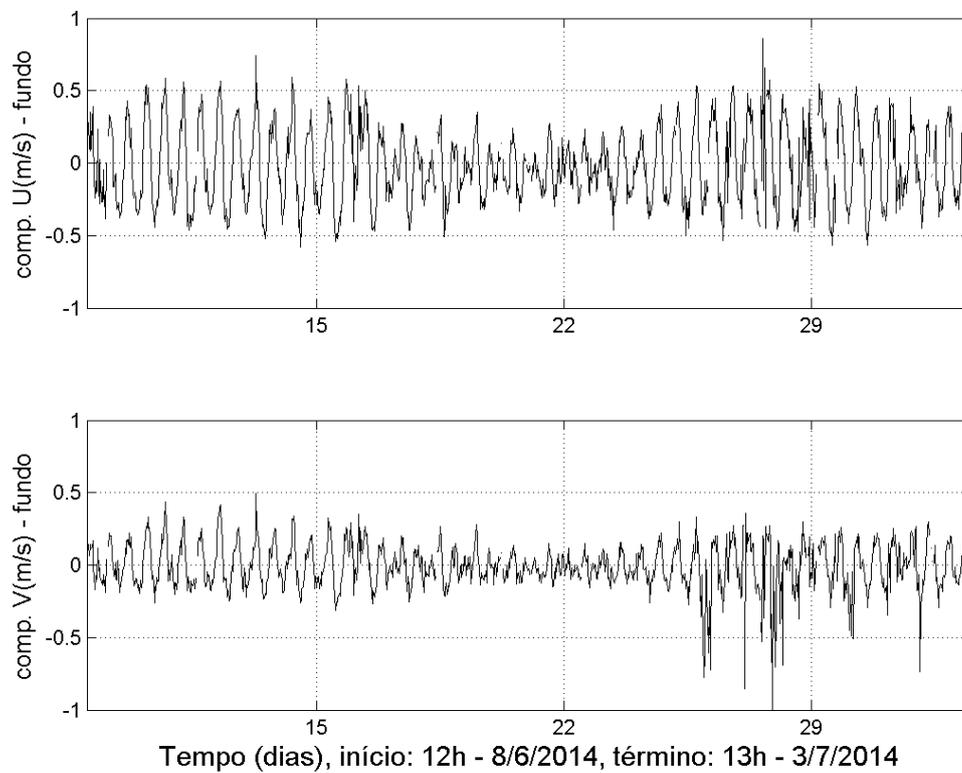
A Figura 32, a Figura 33 e a Figura 34 apresentam as séries temporais das componentes  $u$  e  $v$  da corrente superficial, meia água e junto ao fundo, respectivamente, referentes ao ADCP fundeado em **Bertioga**.



**Figura 32** - Séries temporais das componentes  $u$  e  $v$  da corrente superficial (em m/s), referentes ao ADCP fundeado em Bertioga.

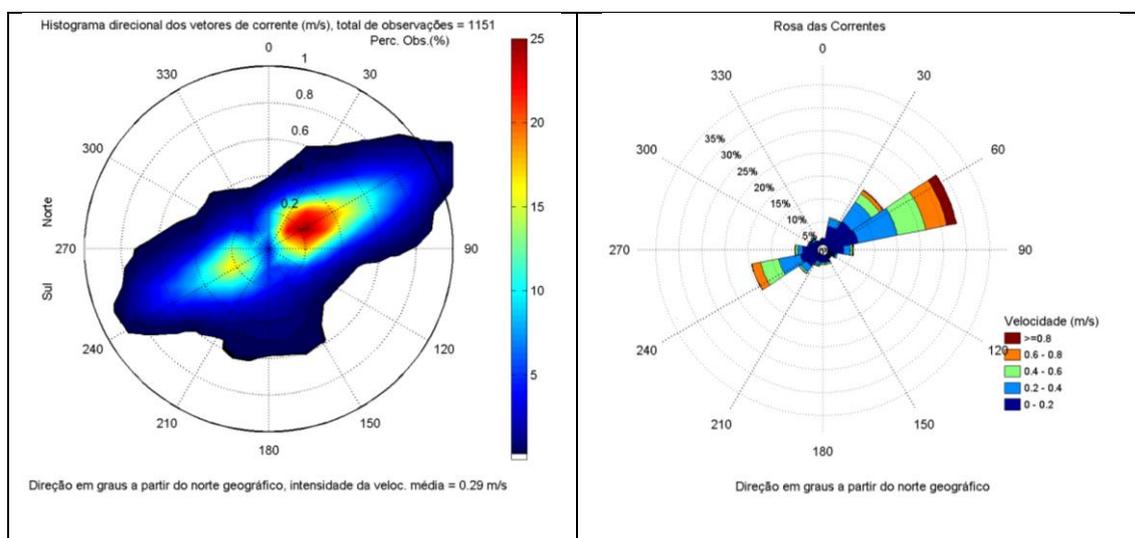


**Figura 33** - Séries temporais das componentes  $u$  e  $v$  em meia água (em m/s), referentes ao ADCP fundeado em Bertioiga.

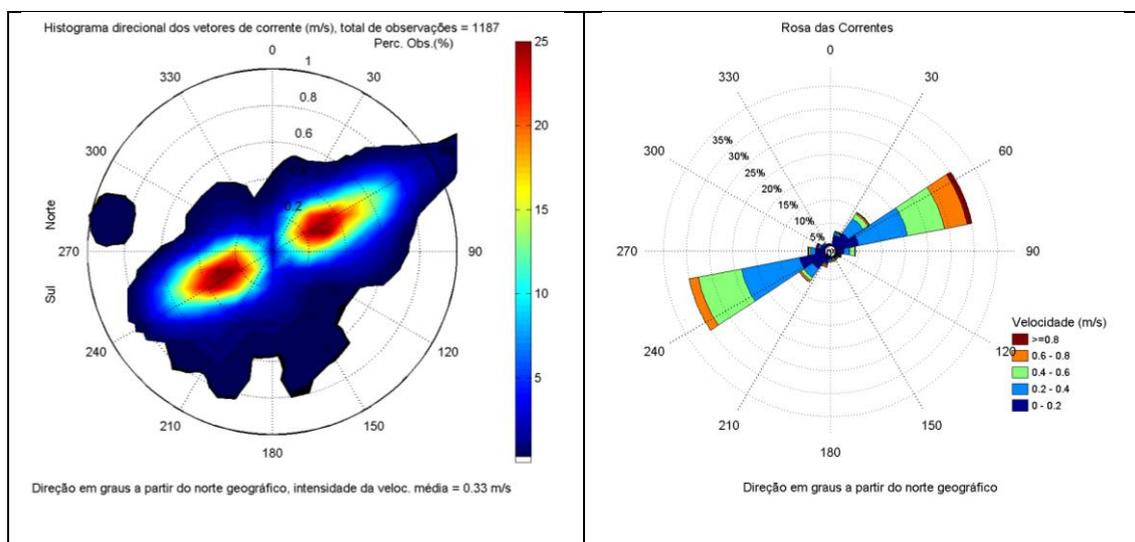


**Figura 34** - Séries temporais das componentes  $u$  e  $v$  no fundo (em m/s), referentes ao ADCP fundeado em Bertioiga.

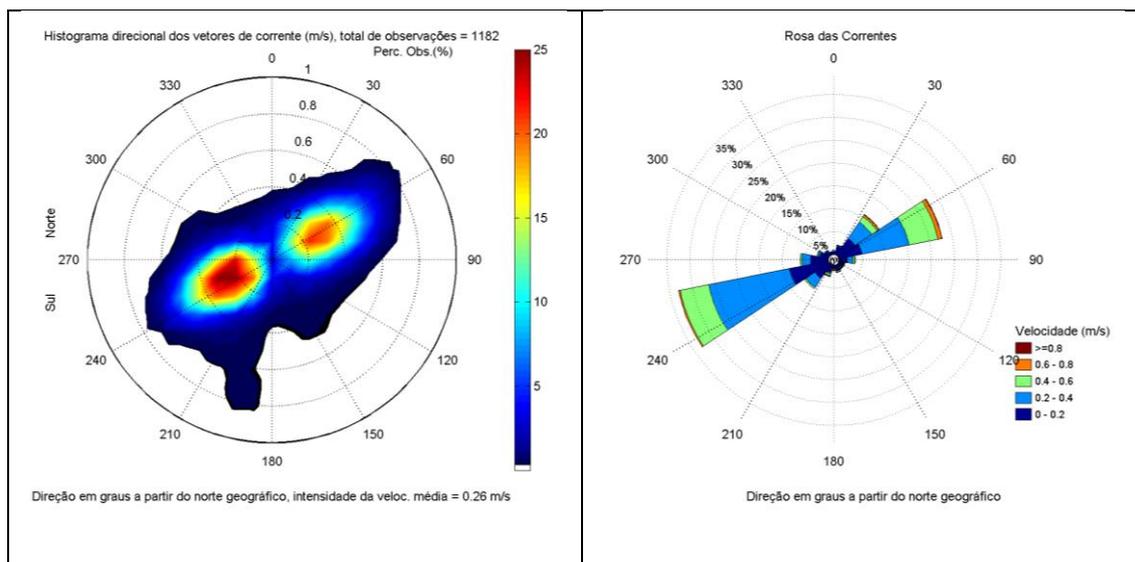
A Figura 35 apresenta o histograma direcional e a rosa de correntes na camada superficial da coluna d'água para o ADCP localizado em **Bertioga**. A Figura 36 apresenta as mesmas análises para meia água, e a a Figura 37 para as correntes junto ao fundo.



**Figura 35** – Histograma direcional (painel esquerdo) e rosa de correntes (painel direito) na superfície, referentes ao ADCP fundeado em Bertioga.



**Figura 36** - Histograma direcional (painel esquerdo) e rosa de correntes (painel direito) em meia água, referentes ao ADCP fundeado em Bertioga.



**Figura 37** - Histograma direcional (painel esquerdo) e rosa de correntes (painel direito) junto ao fundo, referentes ao ADCP fundeado em Bertioga.

A ocorrência conjunta de intensidade e direção da corrente superficial para o ADCP localizado em **Bertioga** é apresentada na Tabela 14. Para as correntes em meia água a ocorrência conjunta é apresentada na Tabela 15, e para as correntes junto ao fundo na Tabela 16.

**Tabela 14** - Ocorrência conjunta de intensidade (cm/s) e direção (°) da corrente na superfície, referente ao ADCP fundeado em Bertioga.

Vel (cm/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Total
0-10	1.216	2.346	2.867	3.041	1.738	1.043	0.608	1.043	1.216	0.608	1.39	1.303	2.346	1.39	1.043	0.782	23.979
10-20	0.174	1.998	3.736	3.91	1.738	0.695	0.174	0.521	0.261	0.869	1.825	2.606	1.043	0.608	0.261	0.174	20.591
20-30	0.087	1.651	3.301	4.431	0.695	0.348	0.087	0.174	0.174	0.695	1.043	2.954	0.782	0.261	0.348	0.087	17.116
30-40	--	0.087	2.085	4.605	0.869	0.087	0.087	0.087	0.174	0.087	0.521	2.085	0.261	--	0.174	--	11.208
40-50	--	0.087	1.39	2.954	0.348	--	--	0.174	0.261	0.087	0.434	2.693	0.348	--	0.087	--	8.862
50-60	--	0.174	0.869	3.562	0.174	--	0.087	0.174	0.087	0.174	--	1.477	0.174	--	--	--	6.95
60-70	--	--	0.434	3.128	0.174	--	--	--	--	--	--	1.564	0.087	--	--	--	5.387
70-80	--	--	0.434	1.825	--	--	0.087	--	--	0.087	--	0.434	0.087	0.087	0.087	--	3.128
80-90	--	--	0.087	1.39	0.087	--	--	--	--	--	--	0.087	--	--	0.174	--	1.825
90-100	--	--	0.087	0.521	--	--	--	--	--	--	0.087	--	--	--	--	--	0.695
100-110	--	--	--	0.174	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.174
110-120	--	--	--	0.087	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.087
<b>Total</b>	1.477	6.342	15.291	29.626	5.821	2.172	1.129	2.172	2.172	2.606	5.3	15.204	5.126	2.346	2.172	1.043	
<b>Vel. Med.</b>	7.7	15.464	26.761	40.72	21.916	12.231	19.204	17.152	16.756	21.558	19.846	34.626	18.456	12.939	22.186	7.588	
<b>Vel. Max.</b>	21.244	59.053	93.82	113.09	87.405	35.236	76.006	57.07	52.495	76.252	90.36	85.77	77.286	79.841	89.982	22.429	

**Tabela 15 - Ocorrência conjunta de intensidade (cm/s) e direção (°) da corrente em meia água, referente ao ADCP fundeado em Bertioga.**

Vel. (cm/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Total
0-10	0.168	1.516	1.432	1.769	0.927	0.505	0.421	0.253	0.253	0.842	1.011	1.516	1.011	0.758	0.505	0.337	13.227
10-20	0.084	0.927	2.106	3.37	0.842	0.253	0.084	--	0.253	0.59	2.443	4.212	1.095	0.337	0.084	0.084	16.765
20-30	--	0.168	2.612	5.476	0.59	--	0.084	0.253	0.253	0.084	1.685	7.329	0.758	0.168	--	0.084	19.545
30-40	0.084	0.337	1.348	5.476	0.674	0.253	--	0.084	0.084	0.168	0.674	5.644	0.253	0.337	0.337	--	15.754
40-50	0.084	0.253	1.011	3.538	0.421	0.168	0.168	0.168	0.168	0.084	0.505	6.403	0.337	--	0.084	--	13.395
50-60	--	--	0.253	4.718	0.758	--	0.084	0.084	0.084	0.168	0.253	3.286	0.084	--	--	--	9.773
60-70	--	0.084	0.168	3.286	0.168	--	0.084	0.168	0.084	0.168	0.337	1.769	--	0.084	--	0.084	6.487
70-80	--	--	0.168	1.769	--	0.168	--	0.168	--	0.253	0.084	0.253	--	--	--	--	2.864
80-90	--	0.084	0.168	0.337	--	--	--	--	--	0.084	--	0.168	0.253	--	--	--	1.095
90-100	--	--	--	0.505	--	--	--	--	--	--	--	--	0.084	--	--	--	0.59
100-110	--	--	--	0.084	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.084
110-120	--	--	--	0.084	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.084	--	--	0.168
120-130	--	--	--	0.084	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.084	--	--	0.168
130-140	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.084	--	--	--	--	--	--	0.084
<b>Total</b>	0.421	3.37	9.267	30.497	4.381	1.348	0.927	1.179	1.179	2.443	7.077	30.413	3.791	2.106	1.011	0.59	
<b>Vel. Med.</b>	20.657	17.785	26.909	41.18	28.068	26.512	25.518	38.206	26.634	30.716	25.683	34.525	23.441	33.678	18.796	16.723	
<b>Vel. Max.</b>	48.952	81.78	88.239	120.18	69.225	77.858	68.265	78.522	67.668	137.87	89.291	72.752	91.158	126.86	42.975	63.192	

**Tabela 16 - Ocorrência conjunta de intensidade (cm/s) e direção (°) da corrente junto ao fundo, referente ao ADCP fundeado em Bertioga.**

Vel (cm/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Total
0-10	0.423	1.184	1.607	1.184	1.184	0.761	0.846	1.015	0.508	1.184	1.607	2.2	1.692	1.523	0.846	0.338	18.105
10-20	0.169	0.761	2.876	3.976	0.592	0.254	--	0.169	0.085	0.423	2.115	6.599	2.2	0.423	0.254	0.254	21.151
20-30	0.254	0.085	1.946	5.922	0.592	0.169	0.169	0.085	0.085	0.169	1.692	9.475	1.269	0.085	0.254	0.085	22.335
30-40	0.085	0.169	2.453	4.653	0.677	0.085	0.085	0.085	--	0.169	0.761	8.629	0.677	0.338	--	--	18.866
40-50	--	--	1.1	4.907	0.338	0.085	--	0.169	0.085	0.085	0.169	4.822	0.254	0.169	--	--	12.183
50-60	--	--	0.423	1.607	0.085	--	0.085	0.085	--	0.338	0.169	1.607	0.085	0.085	--	--	4.569
60-70	--	--	0.254	0.846	0.085	--	0.085	--	0.085	0.085	--	0.338	--	--	--	--	1.777
70-80	--	--	0.169	--	--	--	0.085	0.169	0.085	--	--	--	--	--	--	--	0.508
80-90	--	--	0.085	0.085	--	--	0.085	--	0.085	0.085	--	--	--	--	--	--	0.423
90-100	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
100-110	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
110-120	--	--	--	--	--	--	--	--	0.085	--	--	--	--	--	--	--	0.085
<b>Total</b>	0.931	2.2	10.914	23.181	3.553	1.354	1.354	1.692	1.184	2.623	6.514	33.672	6.176	2.623	1.354	0.677	
<b>Vel. Med.</b>	14.734	10.854	26.559	32.212	21.888	13.714	20.832	18.186	35.671	23.876	19.193	28.822	18.381	15.158	9.674	11.132	
<b>Vel. Max.</b>	36.207	32.302	89.31	88.558	67.279	46.567	83.708	76.585	113	80.856	59.256	63.771	56.723	52.264	25.934	29.642	

Através das análises realizadas, no ADCP localizado no ponto de **Bertioga**, observa-se uma corrente que oscila no eixo ENE-WSW, seguindo a orientação do canal neste ponto (Figura 2).

Na superfície há uma maior porcentagem de observações no quadrante ENE (a soma das direções ENE, NE e E representa 50%, enquanto que a soma das direções WSW, SW e W totaliza 25% das observações). A máxima velocidade observada é de 113 cm/s (ENE), seguida de 93 cm/s (NE) e 90 cm/s (SW). Do total de observações em 95% a velocidade é inferior à 70 cm/s e a velocidade média oscila entre 7 cm/s (NNW) e 40 cm/s (ENE).

Em meia observa-se 30% das correntes para ENE e 30% para WSW. A maior velocidade observada durante o período de medição é de 126 cm/s (WNW), porém também há correntes com velocidades superiores à 100 cm/s da

direção ENE (máxima de 120 cm/s). No entanto, do total de observações em 94% a velocidade é inferior à 70 cm/s e a velocidade média oscila entre 16 cm/s (NNW) e 41 cm/s (ENE).

Junto ao fundo observa-se uma maior porcentagem de observações no quadrante WSW: as direções WSW, SW e W totalizam 46% dos registros, enquanto que as direções ENE, NE e E totalizam 37% dos registros. A maior velocidade observada durante o período de medição é de 113 cm/s (SW), porém não havendo velocidades acima de 90 cm/s de outras direções: máxima de 89 cm/s da direção NE e 88 cm/s (ENE). Do total de observações em 97% a velocidade é inferior à 60 cm/s e a velocidade média oscila entre 9 cm/s (NW) e 35 cm/s (S).

### Constantes Harmônicas

A fim de complementar as análises apresentadas anteriormente, apresenta-se a seguir as constantes harmônicas da FEMAR referentes às estações Porto de Santos e Ilha Barnabé, ambas localizadas nas proximidades da região de estudo. A componente harmônica de maior amplitude é a componente principal lunar ( $M_2$ ), com 36,4 cm para a estação do Porto de Santos e 35,8 cm para a Ilha Barnabé. Em seguida aparece a componente principal lunar  $S_2$  (respectivamente 22,5 cm e 24,9 cm).

Através do número de forma, a maré nestas estações classifica-se como mista, predominantemente semidiurna ( $F = 0,3022$  para o Porto de Santos e  $F = 0,3640$  para Barnabé), através da equação de DEFANT (1960) apresentada anteriormente.

FEMAR-FUNDAÇÃO DE ESTUDOS DO MAR *Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras*

Nome da Estação :		<b>SANTOS (PORTO) – SP</b>			
Localização :		Na torre de passagem dos cabos elétricos pelo canal (Torre Grande)			
Organ. Responsável :		INPH / CODESP / DHN			
Latitude :		23° 57,3' S	Longitude : 46° 18,6' W		
Período Analisado :		01/01/56 a 23/12/56	Nº de Componentes : 32		
Análise Harmônica :		Método Tidal Liverpool Institute			
Classificação :		Maré de Desigualdades Diurnas			
Estabelecimento do Porto: (HWF&C)		II H 55 min	Nível Médio (Zo):		77 cm acima do NR.
Média das Preamares Superiores (MHHW) :		141 cm acima do NR.	Média das Preamares Inferiores (MLHW) :		130 cm acima do NR.
Média das Baixa-mares Superiores (MHLW) :		29 cm acima do NR.	Média das Baixa-mares Inferiores (MLLW) :		7 cm acima do NR.
<b>CONSTANTES HARMÔNICAS SELECIONADAS</b>					
Componentes	Semi-amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)	Componentes	Semi-amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)
Sa	10,2	025	MU <sub>2</sub>	2,1	122
Ssa	5,0	180	N <sub>2</sub>	5,4	149
Mm	4,2	289	NU <sub>2</sub>	0,4	139
Mf	1,7	141	M <sub>2</sub>	36,4	088
MTM	-	-	L <sub>2</sub>	1,6	037
Msf	1,5	121	T <sub>2</sub>	0,8	020
Q <sub>1</sub>	2,5	058	S <sub>2</sub>	22,5	091
O <sub>1</sub>	11,5	081	K <sub>2</sub>	7,4	082
M <sub>1</sub>	0,8	095	MO <sub>3</sub>	0,7	096
P <sub>1</sub>	2,3	136	M <sub>3</sub>	4,9	234
K <sub>1</sub>	6,3	143	MK <sub>3</sub>	2,5	117
J <sub>1</sub>	0,8	192	MN <sub>4</sub>	1,3	318
OO <sub>1</sub>	0,2	133	M <sub>4</sub>	2,6	355
MNS <sub>2</sub>	0,2	189	SN <sub>4</sub>	0,6	061
2N <sub>2</sub>	2,0	149	MS <sub>4</sub>	2,2	143
<b>Referências de Nível:</b> RN Alfândega, situada na Praça da República, no meio fio em frente ao prédio da Delegacia da Receita Federal (antiga Alfândega). RN 2 implantada na sapata da torre do lado do porto.					
<b>Obs:</b> Outros Períodos: 01/01/51 a 04/01/51; 14/11/59 a 15/12/59; 07/02/78 a 23/02/78; 27/02/78 a 27/03/78; 05/09/95 a 07/10/95. Existem outros períodos no INPH e na CODESP Consta das Tábuas das Marés.					

Código BNDO: 50225

**Figura 38** – Constantes harmônicas da FEMAR para o Porto de Santos – SP.

Nome da Estação :		<b>BARNABÉ – SP</b>			
Localização :		No terminal da CODESP na Ilha de Barnabé			
Organ. Responsável :		DHN / CODESP			
Latitude :		23° 55,7' S	Longitude : 46° 20,2' W		
Período Analisado :		04/09/95 a 04/10/95	N° de Componentes : 22		
Análise Harmônica :		Método Almirante Santos Franco			
Classificação :		Maré de Desigualdades Diurnas			
Estabelecimento do Porto: (HWF&C)		III H 00 min	Nível Médio (Zo):		87 cm acima do NR.
Média das Preamares Superiores (MHHW) :		155 cm acima do NR.	Média das Preamares Inferiores (MLHLW) :		141 cm acima do NR.
Média das Baixa-mares Superiores (MHLW) :		40 cm acima do NR.	Média das Baixa-mares Inferiores (MLLW) :		12 cm acima do NR.
<b>CONSTANTES HARMÔNICAS SELECIONADAS</b>					
Componentes	Semi-amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)	Componentes	Semi-amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)
Sa	-	-	MU <sub>2</sub>	-	-
Ssa	-	-	N <sub>2</sub>	3,7	134
Mm	-	-	NU <sub>2</sub>	0,7	128
Mf	-	-	M <sub>2</sub>	35,8	085
MTM	-	-	L <sub>2</sub>	-	-
Msf	-	-	T <sub>2</sub>	1,5	090
Q <sub>1</sub>	-	-	S <sub>2</sub>	24,9	091
O <sub>1</sub>	9,5	074	K <sub>2</sub>	6,8	091
M <sub>1</sub>	-	-	MO <sub>3</sub>	4,8	016
P <sub>1</sub>	4,2	142	M <sub>3</sub>	6,9	224
K <sub>1</sub>	12,6	147	MK <sub>3</sub>	7,1	237
J <sub>1</sub>	5,7	345	MN <sub>4</sub>	-	-
OO <sub>1</sub>	-	-	M <sub>4</sub>	3,5	357
MNS <sub>2</sub>	-	-	SN <sub>4</sub>	2,9	125
2N <sub>2</sub>	0,5	084	MS <sub>4</sub>	-	-
Referências de Nível: RN 1 e 2 instaladas no capeamento da cais de atracação do terminal					
Obs: Não há referências a outros períodos Ver também a estação BNDO 50226 – Ilha de Barnabé					

Código BNDO: 50221

**Figura 39** – Constantes harmônicas da FEMAR para a Ilha Barnabé– SP.

### 3.2. AVALIAÇÃO DO MODELO IMPLEMENTADO (VALIDAÇÃO)

Com o intuito de avaliar a modelagem quanto à sua capacidade de reprodução da circulação hidrodinâmica na região em estudo, neste item são apresentadas comparações entre resultados da modelagem hidrodinâmica e as séries de dados coletadas na região de estudo, além de comparações realizadas

entre resultados do modelo e previsões harmônicas realizadas a partir de estações da FEMAR.

### 3.2.1. Constantes Harmônicas

Resultados de elevação gerados pelo modelo hidrodinâmico foram comparados com previsões harmônicas de maré. As previsões foram realizadas utilizando as constantes harmônicas da FEMAR para as estações Porto de Santos e Ilha Barnabé.

Como o modelo hidrodinâmico foi forçado não apenas com constantes harmônicas, mas também com a elevação do HYCOM, foram realizadas comparações filtrando as ondas de baixa frequência dos resultados de elevação do modelo, a fim de considerar apenas a maré astronômica nas comparações.

A Figura 40 e a Figura 41 apresentam as comparações entre as séries temporais de elevação gerada pelo modelo hidrodinâmico e pela previsão harmônica. Pode-se observar que o modelo consegue representar de forma coerente a amplitude e fase da maré para estes dois pontos internos do domínio. Os parâmetros estimados para quantificar a comparação (dado x modelo) forneceram os seguintes resultados:

RMAE = 28 % (Porto de Santos e Barnabé).

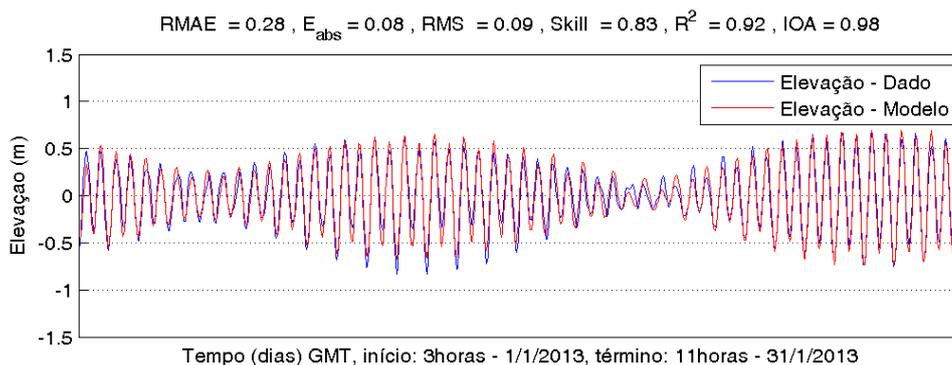
Erro Estatístico Absoluto Médio = 0,08 m (Porto de Santos e Barnabé).

Raiz Quadrática Média = 0,09 m (Porto de Santos) e 0,10 m (Barnabé).

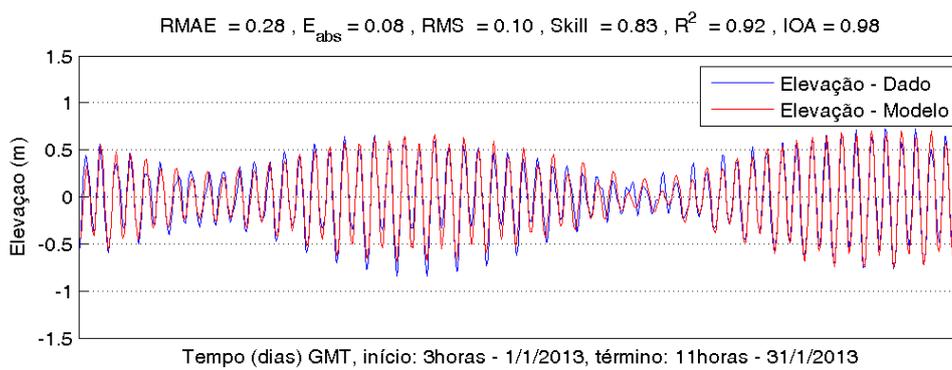
*Skill parameter* (Hess & Bosley) = 0,83 (Porto de Santos e Barnabé).

*Index of agreement* (Willmott & Wicks) = 98 % (Porto de Santos e Barnabé).

Coeficiente de correlação linear = 0,92 (Porto de Santos e Barnabé).



**Figura 40** - Comparações realizadas entre a elevação do nível do mar gerada pelo modelo (vermelho) e série temporal gerada através de previsão harmônica (azul), para o Porto de Santos. A elevação é apresentada em metros.



**Figura 41** - Comparações realizadas entre a elevação do nível do mar gerada pelo modelo (vermelho) e série temporal gerada através de previsão harmônica (azul), para a Ilha Barnabé. A elevação é apresentada em metros.

### 3.2.2. Dados Medidos

O modelo também foi avaliado utilizando os dados de elevação e correntes medidos em campo pelo LDC/IO/USP, além dos dados disponibilizados pela CODESP.

#### Dados Laboratório de Dinâmica Costeira – ADCP Santos

A Figura 42 apresenta as comparações realizadas entre elevação do nível do mar medida e gerada pelo modelo hidrodinâmico, para o mesmo local e período. Os dados medidos em campo são apresentados em azul, enquanto que os resultados do modelo estão em vermelho. Os parâmetros estimados para quantificar a comparação (dado x modelo) forneceram os seguintes resultados:

RMAE = 40 %.

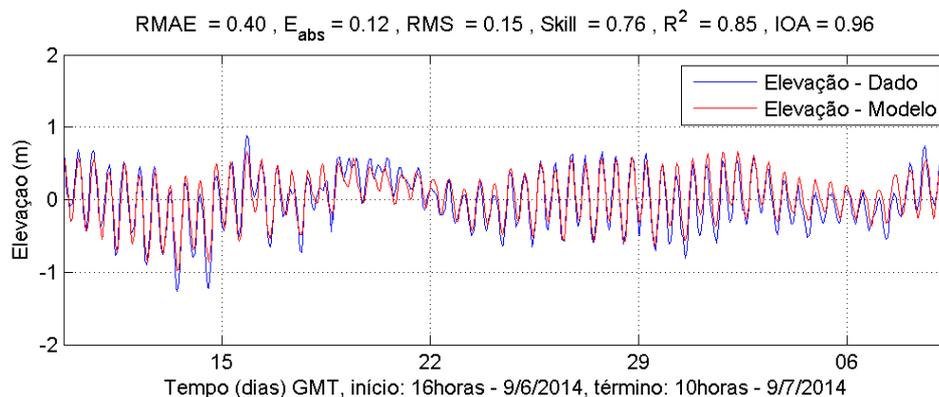
Erro Estatístico Absoluto Médio = 0,12 m.

Raiz Quadrática Média = 0,15 m.

Skill parameter (Hess & Bosley) = 0,76.

Index of agreement (Willmott & Wicks) = 96 %.

Coefficiente de correlação linear = 0,85.



**Figura 42** - Comparações realizadas entre a elevação do nível do mar gerada pelo modelo (vermelho) e dados medidos em campo (azul). A elevação é apresentada em metros.

A fim de demonstrar a importância de utilizar os resultados de um modelo de maior escala como forçante de um modelo de menor escala, os dados de elevação medidos em campo foram também comparados com os resultados de um processamento forçado apenas com constantes harmônicas, ou seja, sem considerar os resultados de elevação e correntes do HYCOM como forçantes.

A Figura 43 apresenta esta comparação. Ao avaliarmos o ajuste do modelo de marés à série de dados medida em campo, observa-se que o modelo não consegue representar os aumentos e reduções do nível do mar, conforme indica o dado medido. Tais variações são melhor captadas no modelo forçado também com os resultados do HYCOM, conforme ilustra a Figura 42.

Os parâmetros estimados para quantificar a comparação (dado x modelo) forneceram os seguintes resultados:

RMAE = 55 %.

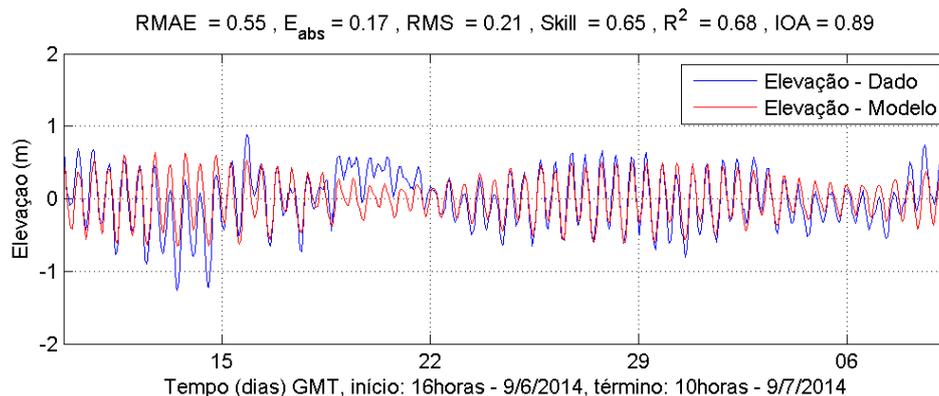
Erro Estatístico Absoluto Médio = 0,17 m.

Raiz Quadrática Média = 0,21 m.

Skill parameter (Hess & Bosley) = 0,65.

Index of agreement (Willmott & Wicks) = 89 %.

Coefficiente de correlação linear = 0,68.



**Figura 43** - Comparações realizadas entre a elevação do nível do mar gerada pelo modelo de maré (vermelho) e dados medidos em campo (azul). A elevação é apresentada em metros.

A seguir são apresentadas as comparações para as componentes  $u$  e  $v$  da corrente superficial e de fundo, entre os dados medidos em campo e resultados do modelo hidrodinâmico. Foram consideradas duas configurações do modelo: com e sem dados de temperatura e salinidade (TS).

Os parâmetros estimados para quantificar a comparação (dado x modelo) forneceram os seguintes resultados:

### Superfície (modelo rodado com TS)

RMAE = 42 % (intensidade), 61 % (comp. U) e 54 % (comp. V).

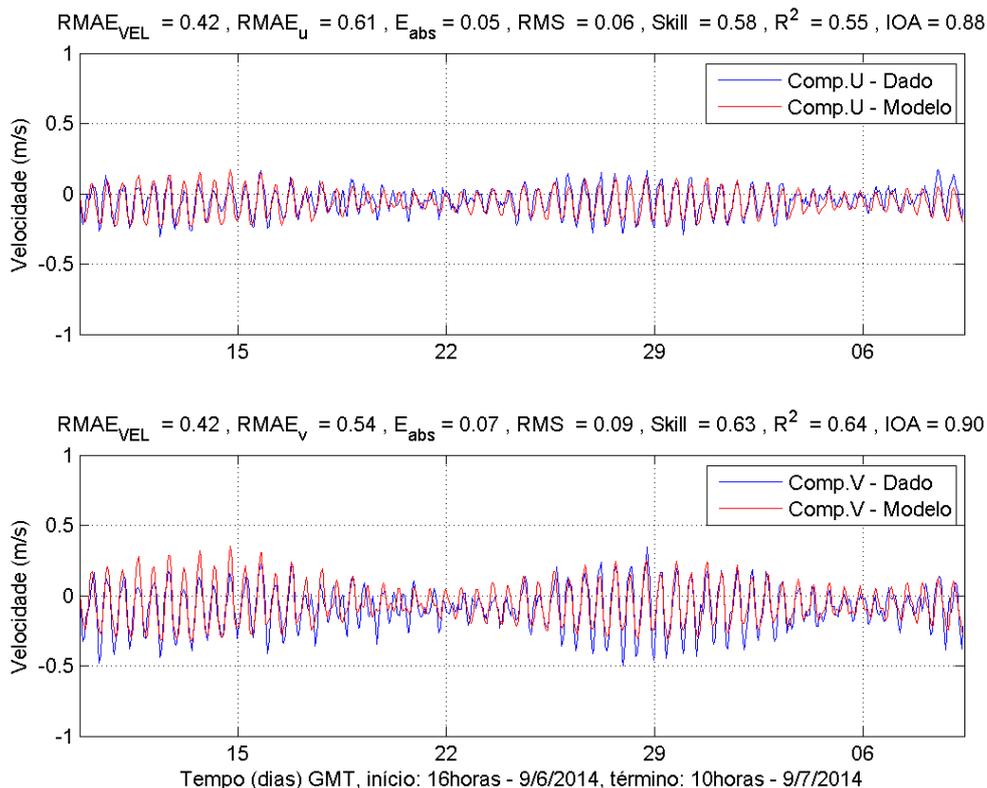
Erro Estatístico Absoluto Médio = 0,05 m/s (comp. U) e 0,07 m/s (comp. V).

Raiz Quadrática Média = 0,06 m/s (comp. U) e 0,09 m/s (comp. V).

Skill parameter (Hess & Bosley) = 0,58 (comp. U) e 0,63 (comp. V).

Index of agreement (Willmott & Wicks) = 0,88 (comp. U) e 0,90 (comp. V).

Coefficiente de correlação linear = 0,55 (comp. U) e 0,64 (comp. V).



**Figura 44** - Comparações realizadas entre as componentes  $u$  e  $v$  da corrente superficial geradas pelo modelo (vermelho) e medidas em campo (azul). As componentes da corrente são apresentadas em metros por segundo.

### Superfície (modelo rodado sem TS)

RMAE = 61 % (intensidade), 79 % (comp. U) e 75 % (comp. V).

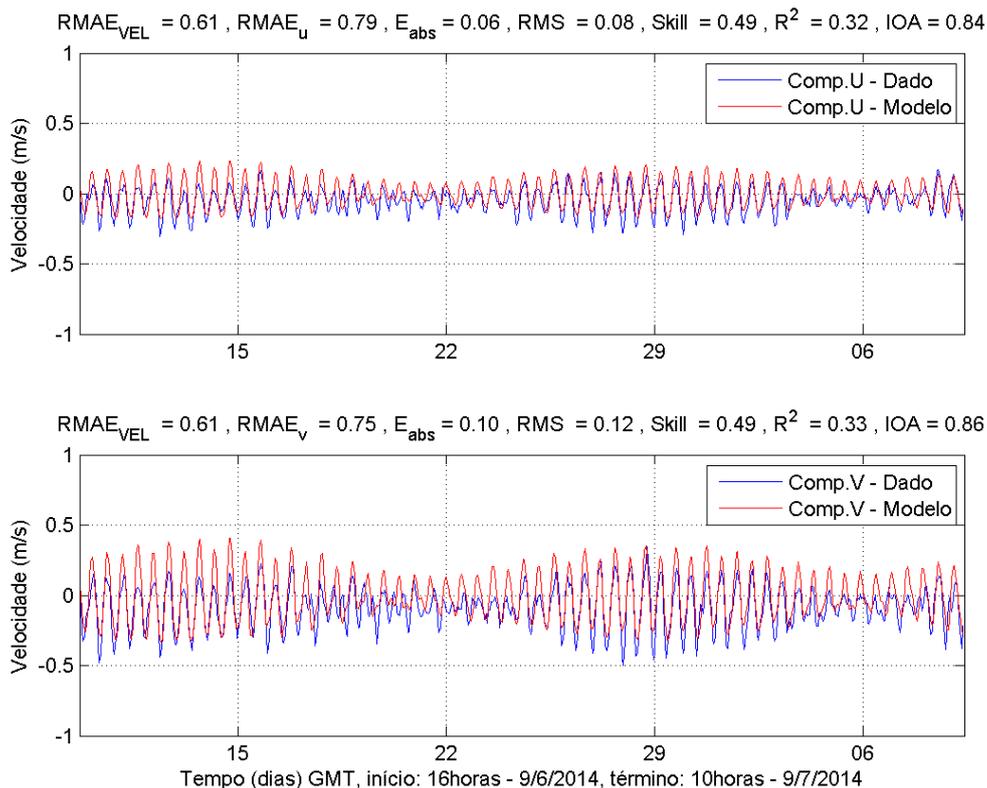
Erro Estatístico Absoluto Médio = 0,06 m/s (comp. U) e 0,10 m/s (comp. V).

Raiz Quadrática Média = 0,08 m/s (comp. U) e 0,12 m/s (comp. V).

Skill parameter (Hess & Bosley) = 0,49 (comp. U) e 0,49 (comp. V).

Index of agreement (Willmott & Wicks) = 0,84 (comp. U) e 0,86 (comp. V).

Coefficiente de correlação linear = 0,32 (comp. U) e 0,33 (comp. V).



**Figura 45** - Comparações realizadas entre as componentes  $u$  e  $v$  da corrente superficial geradas pelo modelo modelo (vermelho) e medidas em campo (azul). As componentes da corrente são apresentadas em metros por segundo.

### Fundo (modelo rodado com TS)

RMAE = 50 % (intensidade), 85 % (comp. U) e 60 % (comp. V).

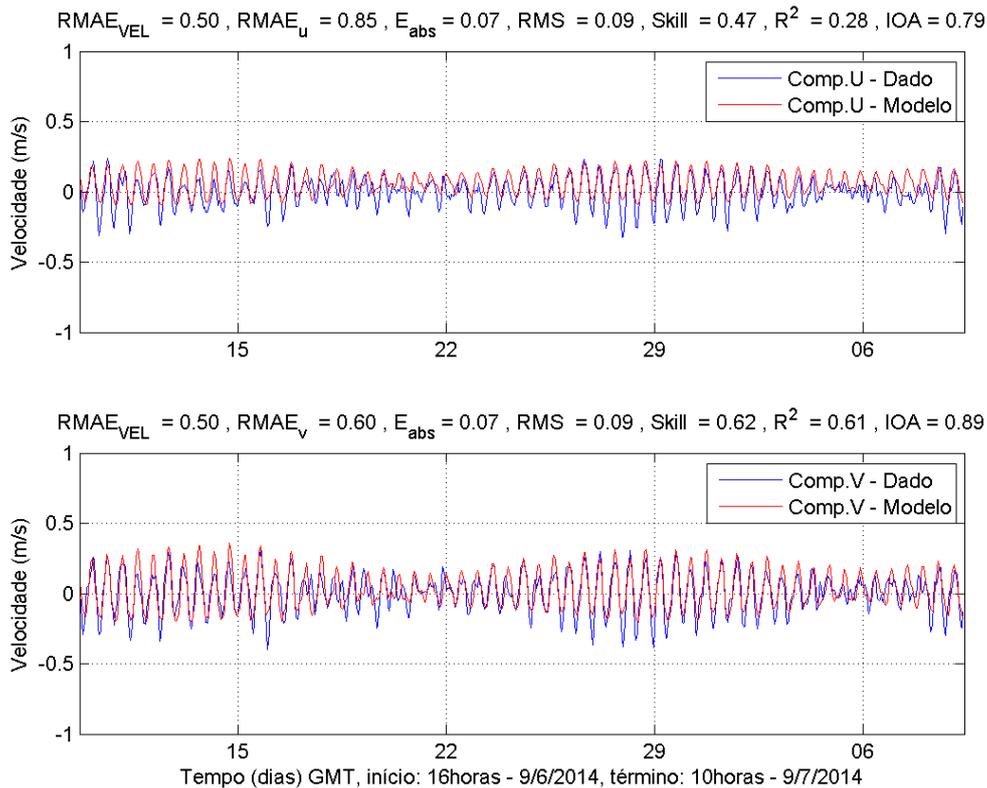
Erro Estatístico Absoluto Médio = 0,07 m/s (comp. U) e 0,07 m/s (comp. V).

Raiz Quadrática Média = 0,09 m/s (comp. U) e 0,09 m/s (comp. V).

Skill parameter (Hess & Bosley) = 0,47 (comp. U) e 0,62 (comp. V).

Index of agreement (Willmott & Wicks) = 0,79 (comp. U) e 0,89 (comp. V).

Coefficiente de correlação linear = 0,28 (comp. U) e 0,61 (comp. V).



**Figura 46** - Comparações realizadas entre as componentes  $u$  e  $v$  da corrente de fundo geradas pelo modelo modelo (vermelho) e medidas em campo (azul). As componentes da corrente são apresentadas em metros por segundo.

### Fundo (modelo rodado sem TS)

RMAE = 45 % (intensidade), 63 % (comp. U) e 61 % (comp. V).

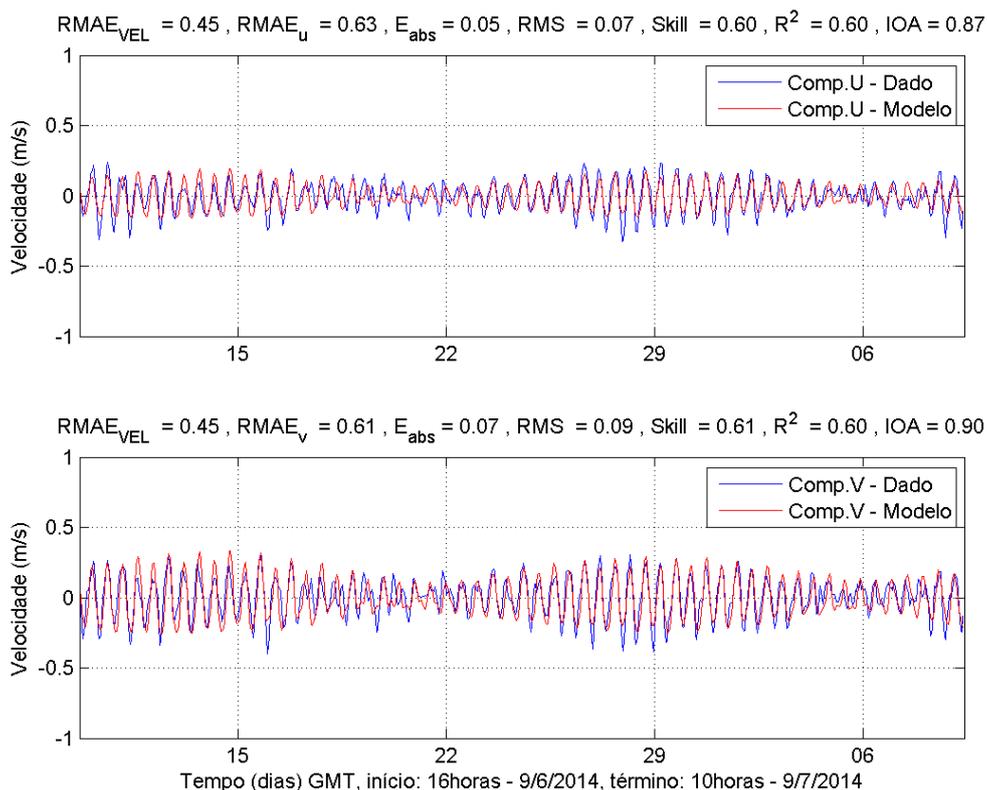
Erro Estatístico Absoluto Médio = 0,05 m/s (comp. U) e 0,07 m/s (comp. V).

Raiz Quadrática Média = 0,07 m/s (comp. U) e 0,09 m/s (comp. V).

Skill parameter (Hess & Bosley) = 0,60 (comp. U) e 0,61 (comp. V).

Index of agreement (Willmott & Wicks) = 0,87 (comp. U) e 0,90 (comp. V).

Coefficiente de correlação linear = 0,60 (comp. U) e 0,60 (comp. V).



**Figura 47** - Comparações realizadas entre as componentes  $u$  e  $v$  da corrente de fundo geradas pelo modelo modelo (vermelho) e medidas em campo (azul). As componentes da corrente são apresentadas em metros por segundo.

#### Dados Laboratório de Dinâmica Costeira – ADCP São Vicente

A Figura 48 apresenta as comparações realizadas entre elevação do nível do mar medida e gerada pelo modelo hidrodinâmico, para o mesmo local e período. Os dados medidos em campo são apresentados em azul, enquanto que os resultados do modelo estão em vermelho. Os parâmetros estimados para quantificar a comparação (dado x modelo) forneceram os seguintes resultados:

RMAE = 48 %.

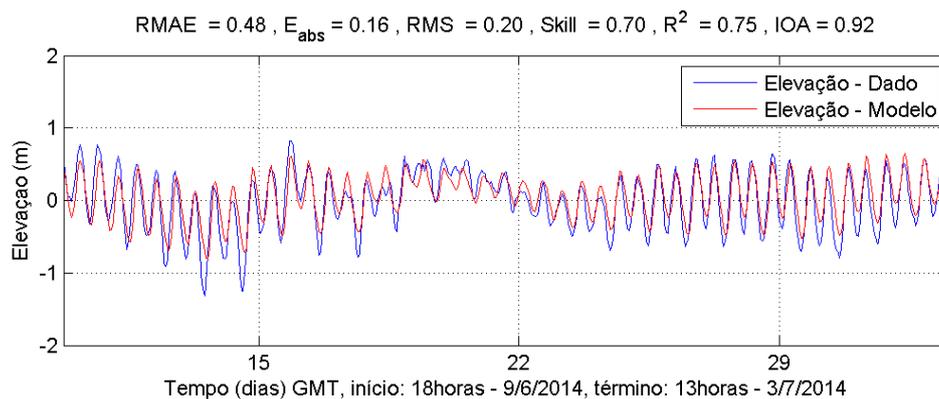
Erro Estatístico Absoluto Médio = 0,16 m.

Raiz Quadrática Média = 0,20 m.

Skill parameter (Hess & Bosley) = 0,70.

Index of agreement (Willmott & Wicks) = 92 %.

Coefficiente de correlação linear = 0,75.



**Figura 48** - Comparações realizadas entre a elevação do nível do mar gerada pelo modelo (vermelho) e dados medidos em campo (azul). A elevação é apresentada em metros.

A seguir são apresentadas as comparações para as componentes  $u$  e  $v$  da corrente superficial e de fundo, entre os dados medidos em campo e resultados do modelo hidrodinâmico. Foram consideradas duas configurações do modelo: com e sem dados de temperatura e salinidade (TS).

Os parâmetros estimados para quantificar a comparação (dado x modelo) forneceram os seguintes resultados:

### Superfície (modelo rodado com TS)

RMAE = 38 % (intensidade), 50 % (comp. U) e 62 % (comp. V).

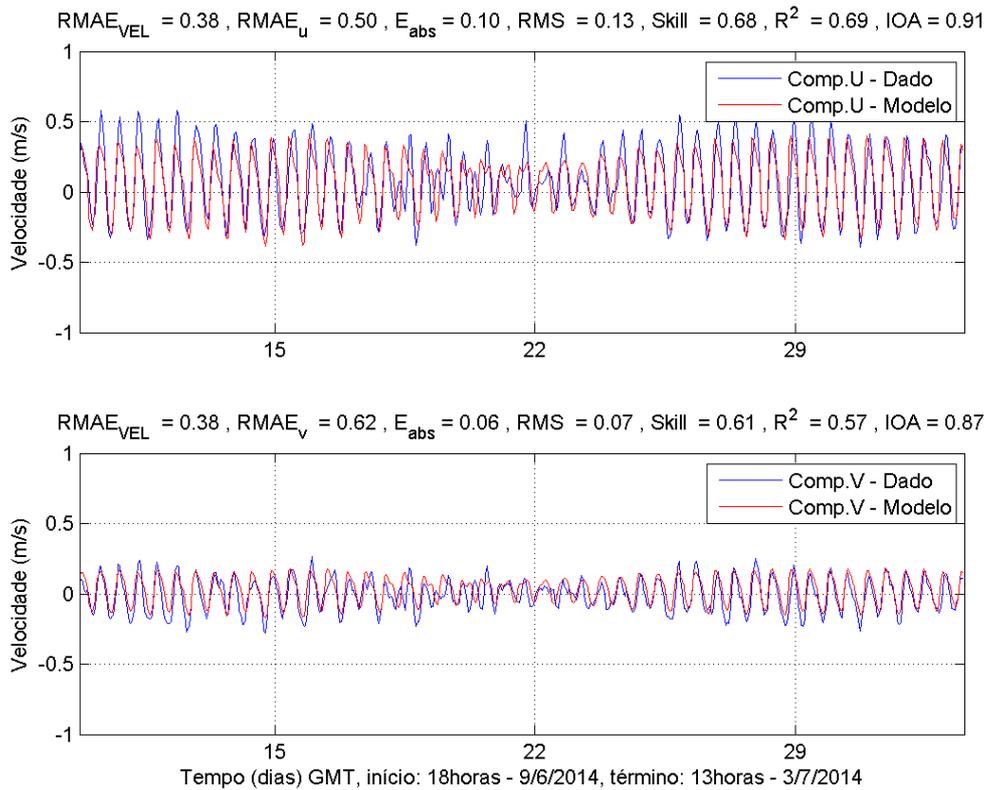
Erro Estatístico Absoluto Médio = 0,10 m/s (comp. U) e 0,06 m/s (comp. V).

Raiz Quadrática Média = 0,13 m/s (comp. U) e 0,07 m/s (comp. V).

Skill parameter (Hess & Bosley) = 0,68 (comp. U) e 0,61 (comp. V).

Index of agreement (Willmott & Wicks) = 0,91 (comp. U) e 0,87 (comp. V).

Coeficiente de correlação linear = 0,69 (comp. U) e 0,57 (comp. V).



**Figura 49** - Comparações realizadas entre as componentes  $u$  e  $v$  da corrente superficial geradas pelo modelo modelo (vermelho) e medidas em campo (azul). As componentes da corrente são apresentadas em metros por segundo.

### Superfície (modelo rodado sem TS)

RMAE = 44 % (intensidade), 56 % (comp. U) e 55 % (comp. V).

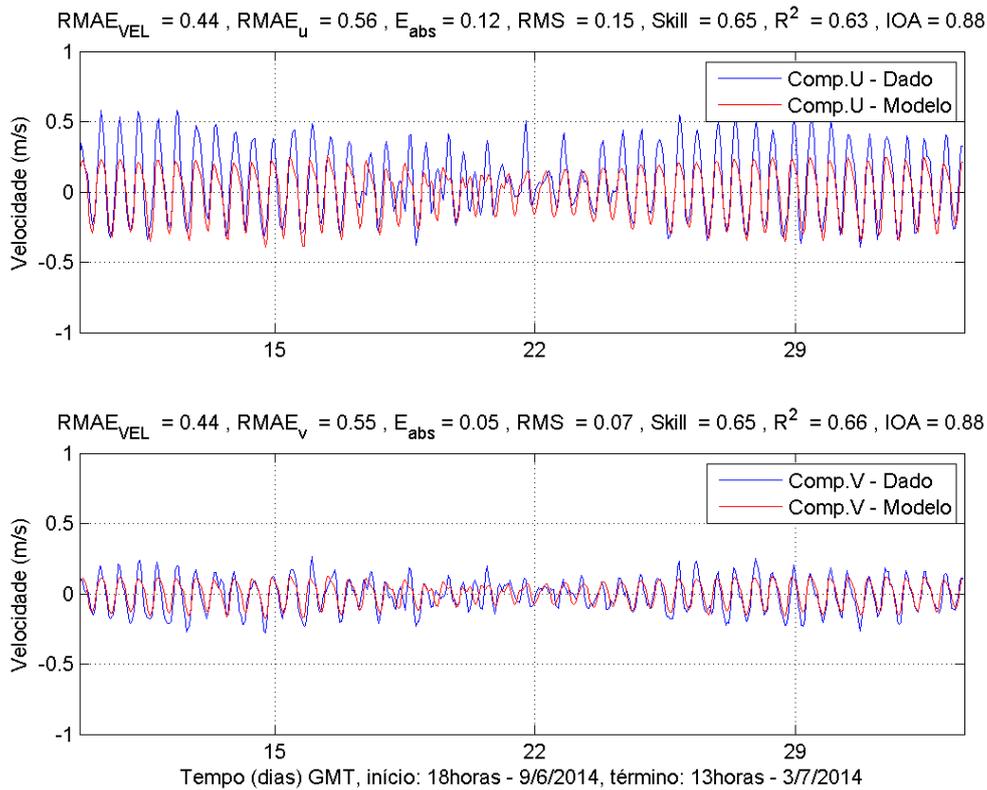
Erro Estatístico Absoluto Médio = 0,12 m/s (comp. U) e 0,05 m/s (comp. V).

Raiz Quadrática Média = 0,15 m/s (comp. U) e 0,07 m/s (comp. V).

Skill parameter (Hess & Bosley) = 0,65 (comp. U) e 0,65 (comp. V).

Index of agreement (Willmott & Wicks) = 0,88 (comp. U) e 0,88 (comp. V).

Coeficiente de correlação linear = 0,63 (comp. U) e 0,66 (comp. V).



**Figura 50** - Comparações realizadas entre as componentes  $u$  e  $v$  da corrente superficial geradas pelo modelo modelo (vermelho) e medidas em campo (azul). As componentes da corrente são apresentadas em metros por segundo.

### Fundo (modelo rodado com TS)

RMAE = 56 % (intensidade), 64 % (comp. U) e 56 % (comp. V).

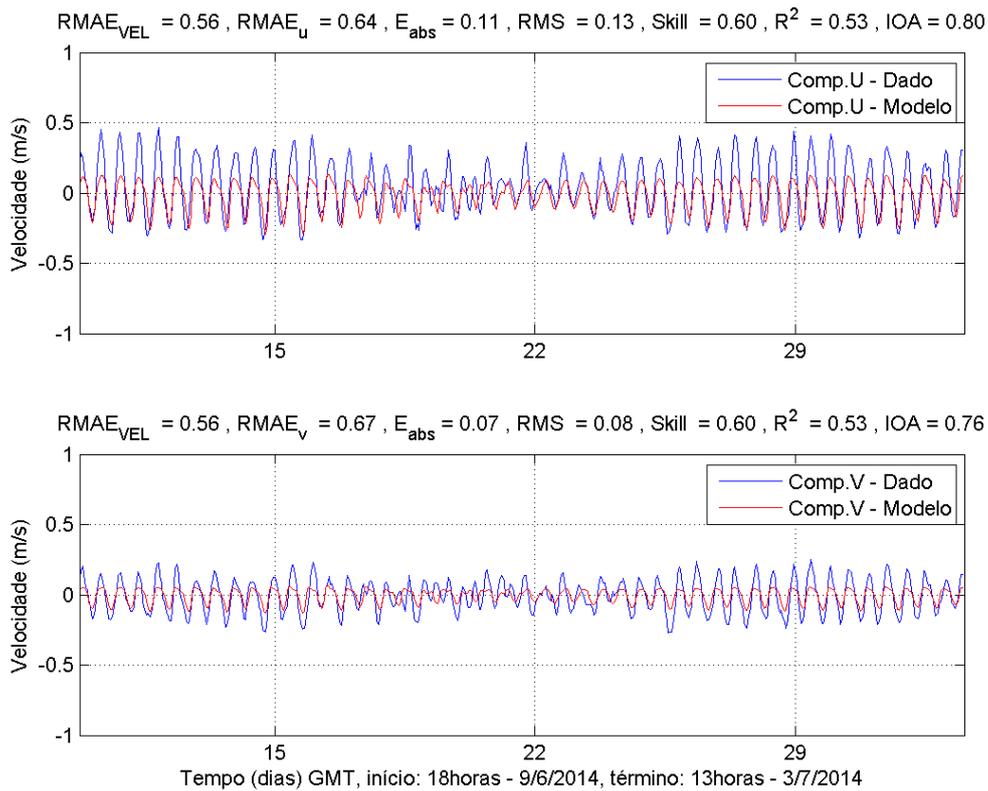
Erro Estatístico Absoluto Médio = 0,11 m/s (comp. U) e 0,07 m/s (comp. V).

Raiz Quadrática Média = 0,13 m/s (comp. U) e 0,08 m/s (comp. V).

Skill parameter (Hess & Bosley) = 0,60 (comp. U) e 0,60 (comp. V).

Index of agreement (Willmott & Wicks) = 0,80 (comp. U) e 0,76 (comp. V).

Coefficiente de correlação linear = 0,53 (comp. U) e 0,53 (comp. V).



**Figura 51** - Comparações realizadas entre as componentes  $u$  e  $v$  da corrente de fundo geradas pelo modelo modelo (vermelho) e medidas em campo (azul). As componentes da corrente são apresentadas em metros por segundo.

### Fundo (modelo rodado sem TS)

RMAE = 46 % (intensidade), 55 % (comp. U) e 60 % (comp. V).

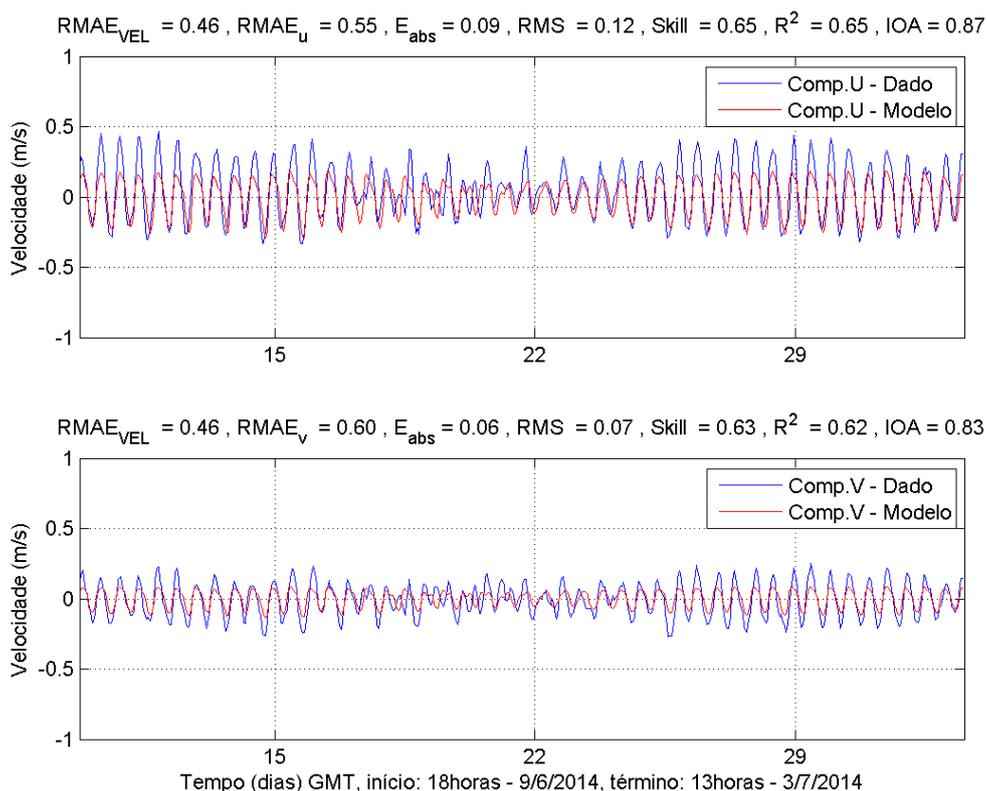
Erro Estatístico Absoluto Médio = 0,09 m/s (comp. U) e 0,06 m/s (comp. V).

Raiz Quadrática Média = 0,12 m/s (comp. U) e 0,07 m/s (comp. V).

Skill parameter (Hess & Bosley) = 0,65 (comp. U) e 0,63 (comp. V).

Index of agreement (Willmott & Wicks) = 0,87 (comp. U) e 0,83 (comp. V).

Coefficiente de correlação linear = 0,65 (comp. U) e 0,62 (comp. V).



**Figura 52** - Comparações realizadas entre as componentes  $u$  e  $v$  da corrente de fundo geradas pelo modelo modelo (vermelho) e medidas em campo (azul). As componentes da corrente são apresentadas em metros por segundo.

### Dados CODESP

A Figura 53 apresenta as comparações realizadas entre elevação do nível do mar medida e gerada pelo modelo hidrodinâmico, para o mesmo local e período. Os dados medidos em campo são apresentados em azul, enquanto que os resultados do modelo estão em vermelho. Os parâmetros estimados para quantificar a comparação (dado x modelo) forneceram os seguintes resultados:

RMAE = 48 %.

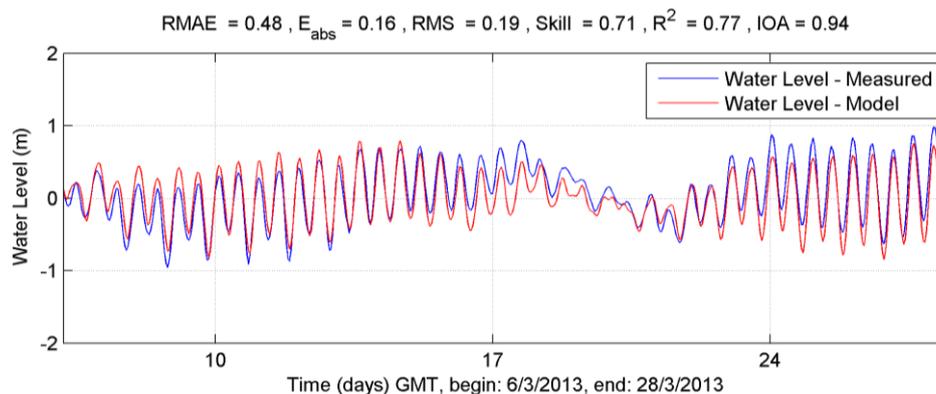
Erro Estatístico Absoluto Médio = 0,16 m.

Raiz Quadrática Média = 0,19 m.

Skill parameter (Hess & Bosley) = 0,71.

Index of agreement (Willmott & Wicks) = 94 %.

Coefficiente de correlação linear = 0,77.



**Figura 53** - Comparações realizadas entre a elevação do nível do mar gerada pelo modelo (vermelho) e dados medidos em campo (azul). A elevação é apresentada em metros.

Novamente os dados de elevação medidos em campo foram também comparados com resultados de um modelo forçado apenas com constantes harmônicas (sem considerar os resultados de elevação e correntes do HYCOM como forçantes).

A Figura 54 apresenta esta comparação. Ao avaliarmos o ajuste do modelo de marés à série de dados medida em campo, observa-se que o modelo não consegue representar os aumentos e reduções do nível do mar, conforme indica o dado medido. Tais variações são melhor captadas no modelo forçado também com os resultados do HYCOM, conforme ilustra a Figura 53 (o comportamento descrito fica mais claro entre os dias 17 e 24 de março).

Os parâmetros estimados para quantificar a comparação (dado x modelo) forneceram os seguintes resultados:

RMAE = 63 %.

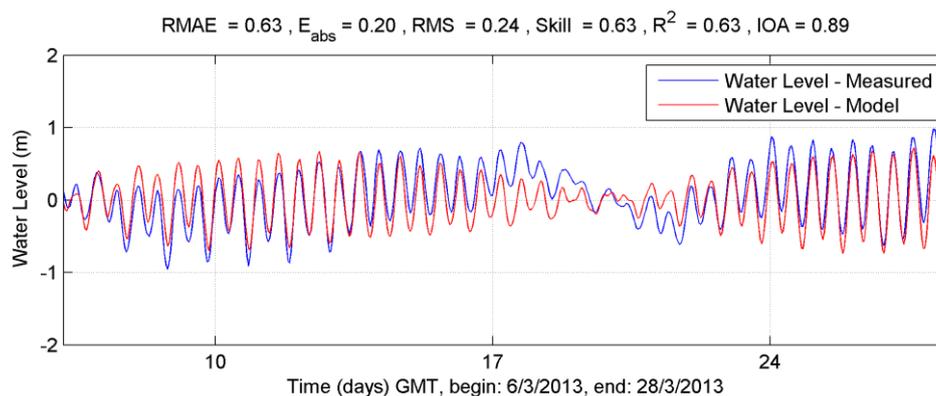
Erro Estatístico Absoluto Médio = 0,20 m.

Raiz Quadrática Média = 0,24 m.

Skill parameter (Hess & Bosley) = 0,63.

Index of agreement (Willmott & Wicks) = 89 %.

Coefficiente de correlação linear = 0,63.



**Figura 54** - Comparações realizadas entre a elevação do nível do mar gerada pelo modelo de maré (vermelho) e dados medidos em campo (azul). A elevação é apresentada em metros.

Com o objetivo de facilitar as análises e comparar os resultados de validação do modelo (entre dados distintos), a Tabela 17 reúne os resultados obtidos das comparações realizadas entre a elevação gerada pelo modelo e os dados de elevação medidos em campo ou previsões harmônicas de maré. De forma análoga, a Tabela 18 apresenta os índices obtidos nas comparações de corrente.

**Tabela 17** – Parâmetros estimados ao compararmos os resultados de modelo com os dados medidos e previsões harmônicas de maré.

Dado	Parâmetros					
	RMAE (%)	Eabs (m)	RMS (m)	Skill	R2	IOA (%)
Elevação FEMAR Barnabé	28	0,08	0,10	0,83	0,92	98
Elevação FEMAR Porto	28	0,08	0,09	0,83	0,92	98
Elevação LDC Santos	40	0,12	0,15	0,76	0,85	96
Elevação LDC Santos (astro)	55	0,17	0,21	0,65	0,68	89
Elevação LDC São Vicente	48	0,16	0,20	0,70	0,75	92
Elevação CODESP	48	0,16	0,19	0,71	0,77	94
Elevação CODESP (astro)	63	0,20	0,24	0,63	0,63	63

**Tabela 18** – Parâmetros estimados ao compararmos os resultados de modelo com os dados de corrente medidos.

Dado	Parâmetros					
	RMAE (%)	Eabs (m/s)	RMS (m/s)	Skill	R2	IOA (%)
Comp. U Santos SUP. TS	61	0,05	0,06	0,58	0,55	88
Comp. U Santos SUP.	79	0,06	0,08	0,49	0,32	84
Comp. V Santos SUP. TS	54	0,07	0,09	0,63	0,64	90
Comp. V Santos SUP.	75	0,10	0,12	0,49	0,33	86
Comp. U Santos FUN. TS	85	0,07	0,09	0,47	0,28	79
Comp. U Santos FUN.	63	0,05	0,07	0,60	0,60	87
Comp. V Santos FUN. TS	60	0,07	0,09	0,62	0,61	89
Comp. V Santos FUN.	61	0,07	0,09	0,61	0,60	90
Comp. U SVicente SUP. TS	50	0,10	0,13	0,68	0,69	91
Comp. U SVicente SUP.	56	0,12	0,15	0,65	0,63	88
Comp. V SVicente SUP. TS	62	0,06	0,07	0,61	0,57	87
Comp. V SVicente SUP.	55	0,05	0,07	0,65	0,66	88
Comp. U SVicente FUN. TS	64	0,11	0,13	0,60	0,53	80
Comp. U SVicente FUN.	55	0,09	0,12	0,65	0,65	87
Comp. V SVicente FUN. TS	56	0,07	0,08	0,60	0,53	76
Comp. V SVicente FUN.	60	0,06	0,07	0,63	0,62	83

### 3.3. CENÁRIOS IPCC

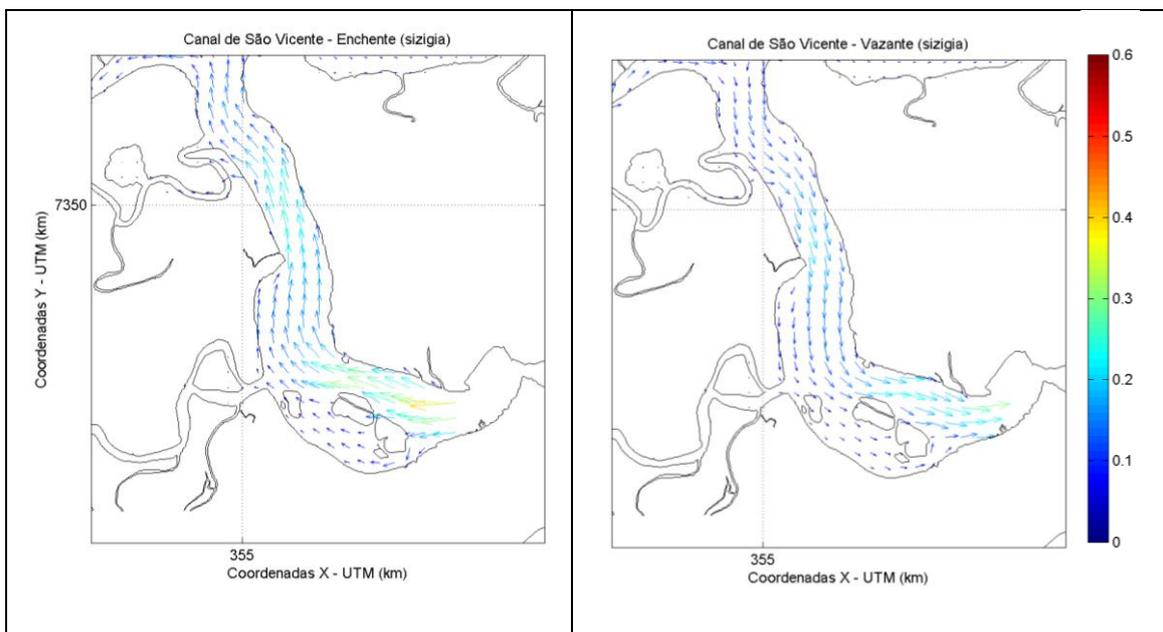
A seguir serão apresentados resultados gerados pelo modelo, para os cenários 1, 2 e 3 propostos neste estudo.

O cenário atual, denominado de Cenário 1, refere-se ao modelo que utiliza como forçantes os resultados de elevação e correntes do HYCOM, além das componentes harmônicas de maré, e vazões médias mensais; Os Cenários 2 e 3 consideram as projeções realizadas, totalizando respectivamente 0,5 m e 1,0 m de aumento do nível do mar.

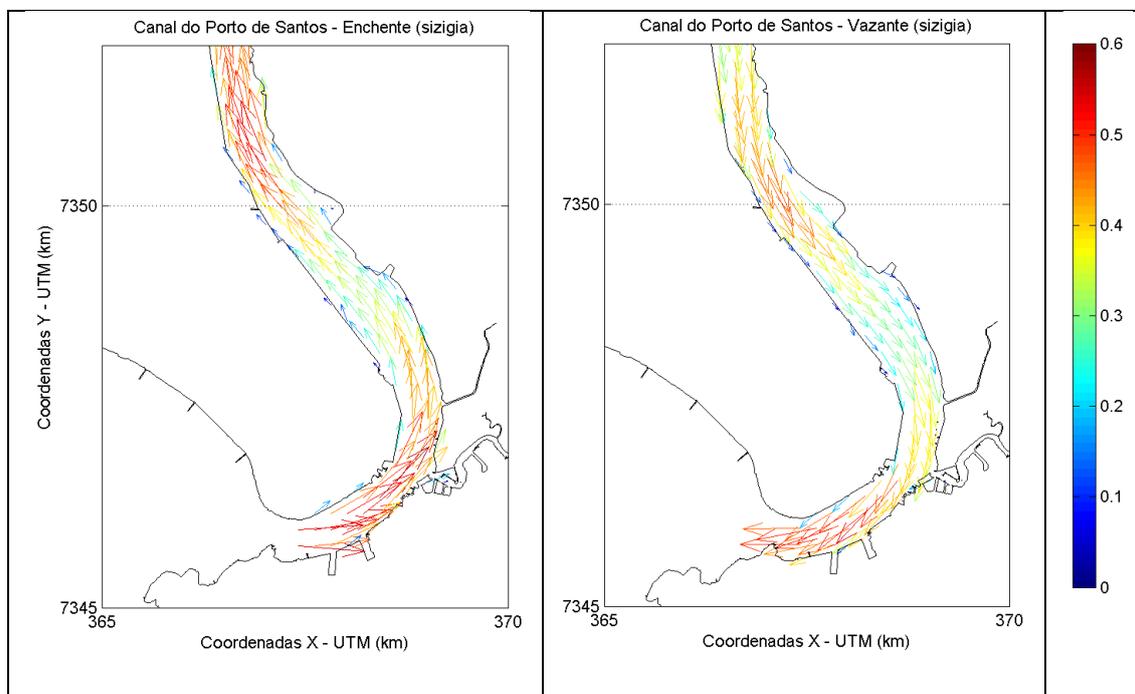
Serão avaliados inicialmente dois instantes, ambos referentes a uma maré de sizígia: um durante a enchente (14/03/2013 05:00) e outro na vazante (14/03/2013 10:00)

As figuras a seguir ilustram os vetores de velocidade na camada mais superficial do modelo, para os dois instantes de maré enchente e vazante escolhidos, para os 3 canais do Sistema Estuarino de Santos: Canal de São Vicente (Figura 55), Canal do Porto de Santos (Figura 56) e Canal de Bertioiga

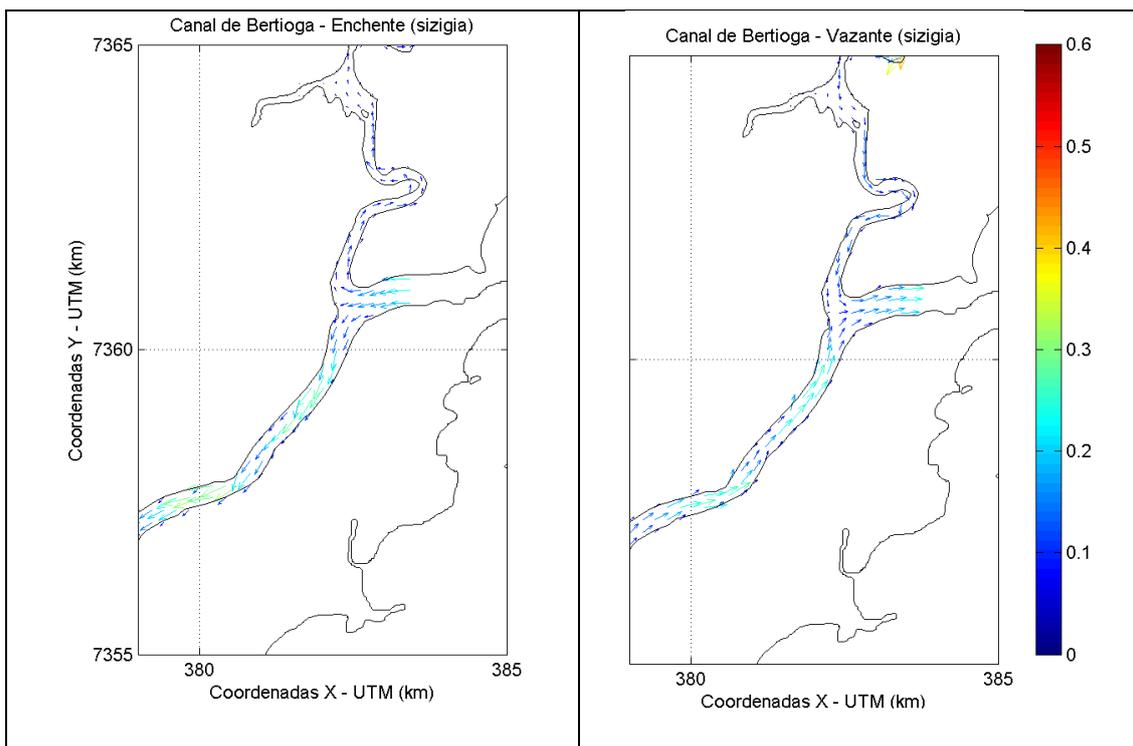
(Figura 57). A escala de cores apresenta a magnitude, em metros por segundo, e os vetores apontam a direção da corrente.



**Figura 55** - Campo instantâneo de correntes para um instante de maré enchente (painel esquerdo) e vazante (painel direito) para o Canal de São Vicente. A escala lateral de cores apresenta a magnitude, em metros por segundo, e os vetores apontam a direção da corrente.



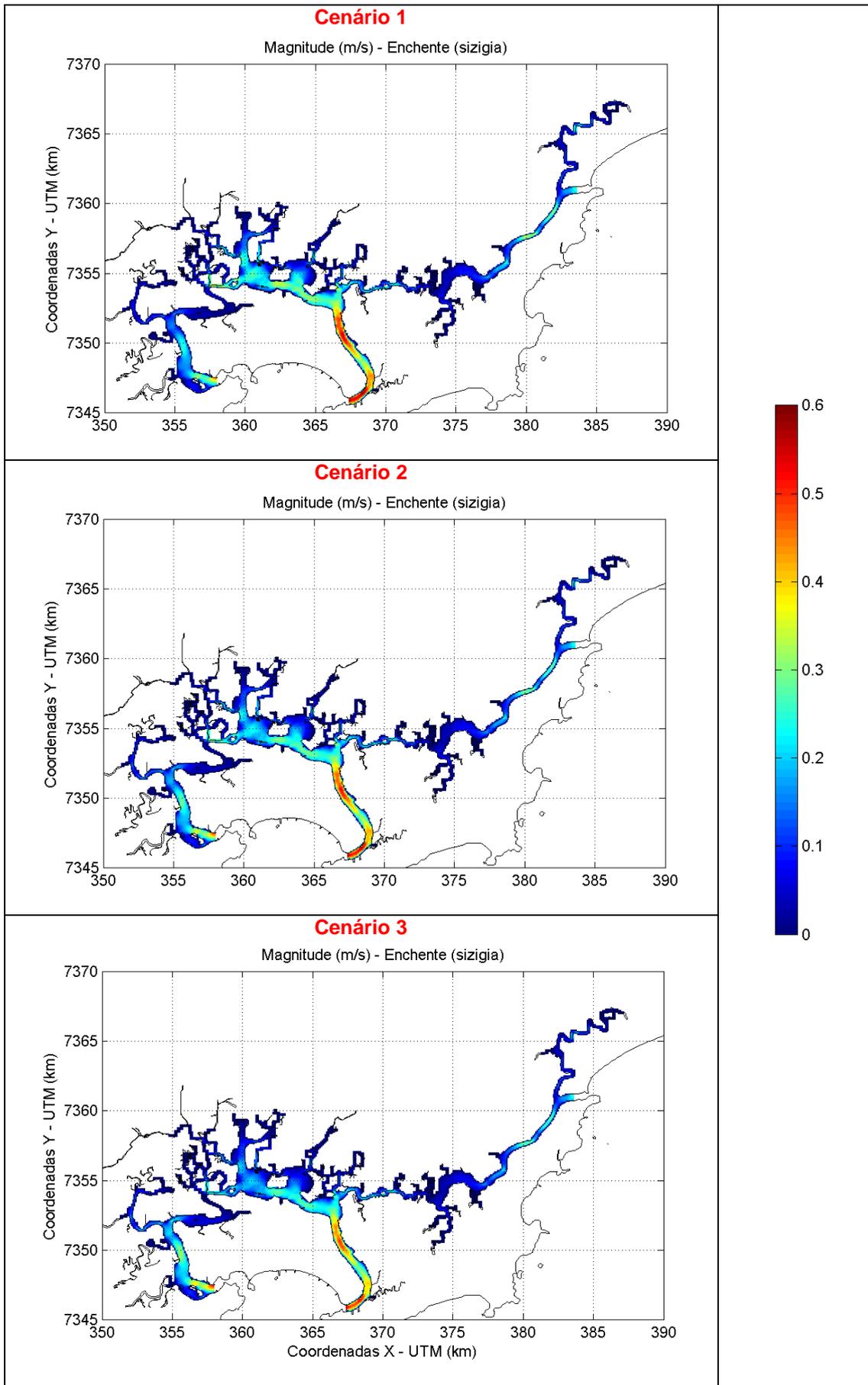
**Figura 56** - Campo instantâneo de correntes para um instante de maré enchente (painel esquerdo) e vazante (painel direito) para o Canal do Porto de Santos. A escala lateral de cores apresenta a magnitude, em metros por segundo, e os vetores apontam a direção da corrente.



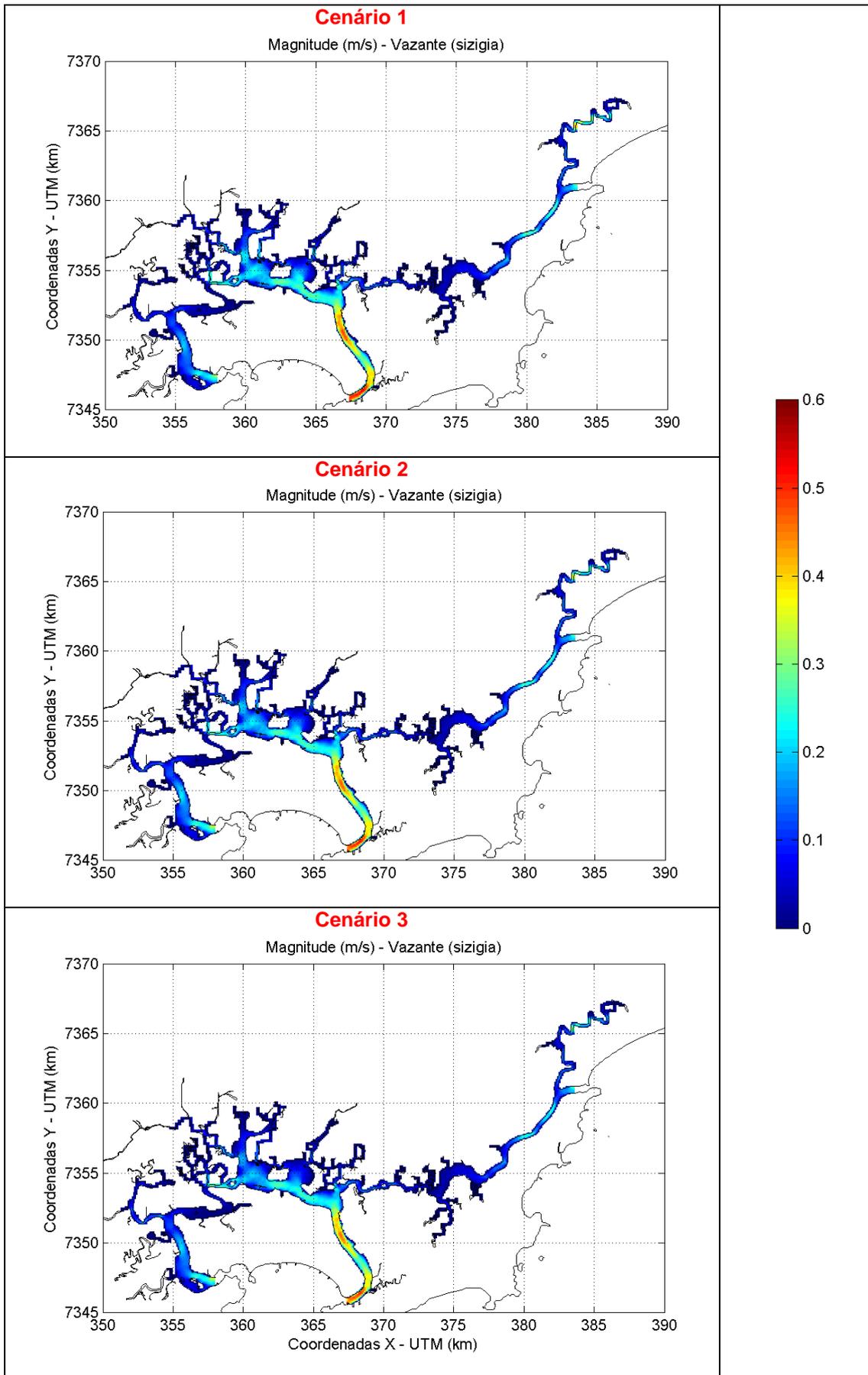
**Figura 57** - Campo instantâneo de correntes para um instante de maré enchente (painel esquerdo) e vazante (painel direito) para o Canal de Bertioga. A escala lateral de cores apresenta a magnitude, em metros por segundo, e os vetores apontam a direção da corrente.

Com o objetivo de avaliar os possíveis impactos do aumento do nível do mar na hidrodinâmica da região do Estuário de Santos, a seguir são apresentadas figuras de velocidade da corrente para os instantes de enchente e vazante, com os resultados dos cenários 1, 2 e 3.

A Figura 58 apresenta a magnitude da corrente superficial no Sistema Estuarino de Santos em um instante de maré enchente (sizígia), para os cenários 1, 2 e 3. De forma análoga, a Figura 59 apresenta a magnitude da corrente superficial em um instante de maré vazante.



**Figura 58** - Magnitude das correntes superficiais para um instante de maré enchente.

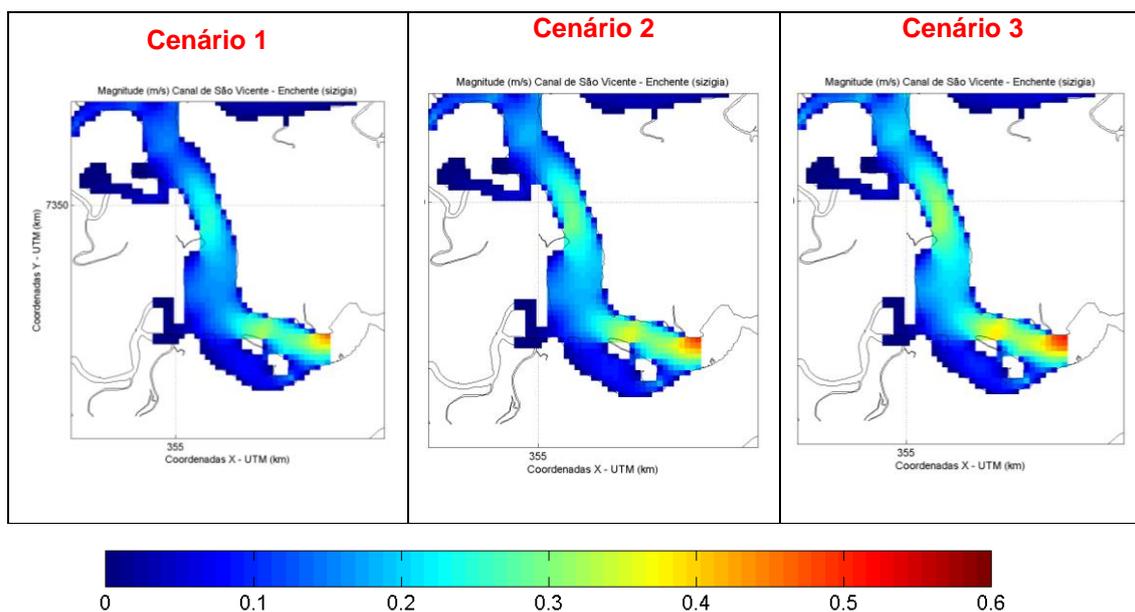


**Figura 59** - Magnitude das correntes superficiais para um instante de maré vazante.

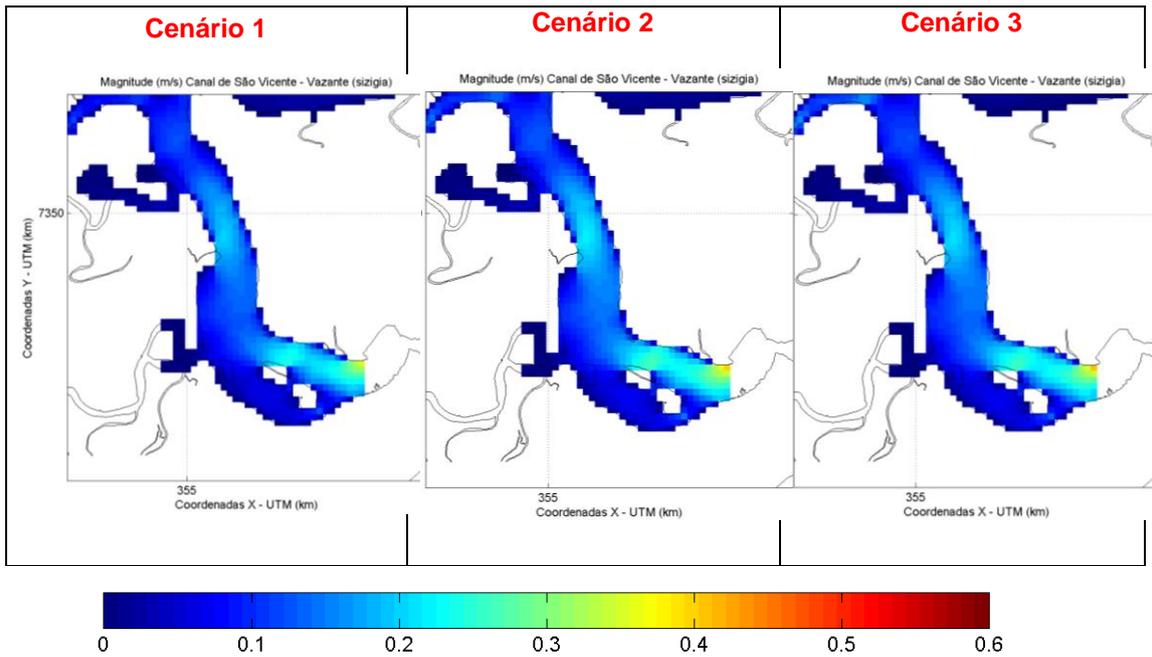
Devido à complexidade do Sistema Estuarino de Santos e diversidade de canais e reentrâncias, torna-se difícil avaliar as diferenças de magnitude entre os três cenários. Desta forma, a seguir são apresentadas comparações para diferentes regiões da grade numérica.

A Figura 60 apresenta a magnitude das correntes superficiais para um instante de maré enchente, no Canal de São Vicente. Observa-se um aumento da magnitude da corrente em praticamente todo o Canal de São Vicente ao se considerar um aumento do nível do mar (do Cenário 1 para o Cenário 3). O mesmo, porém não tão evidente, pode ser observado durante uma maré vazante, através da Figura 61.

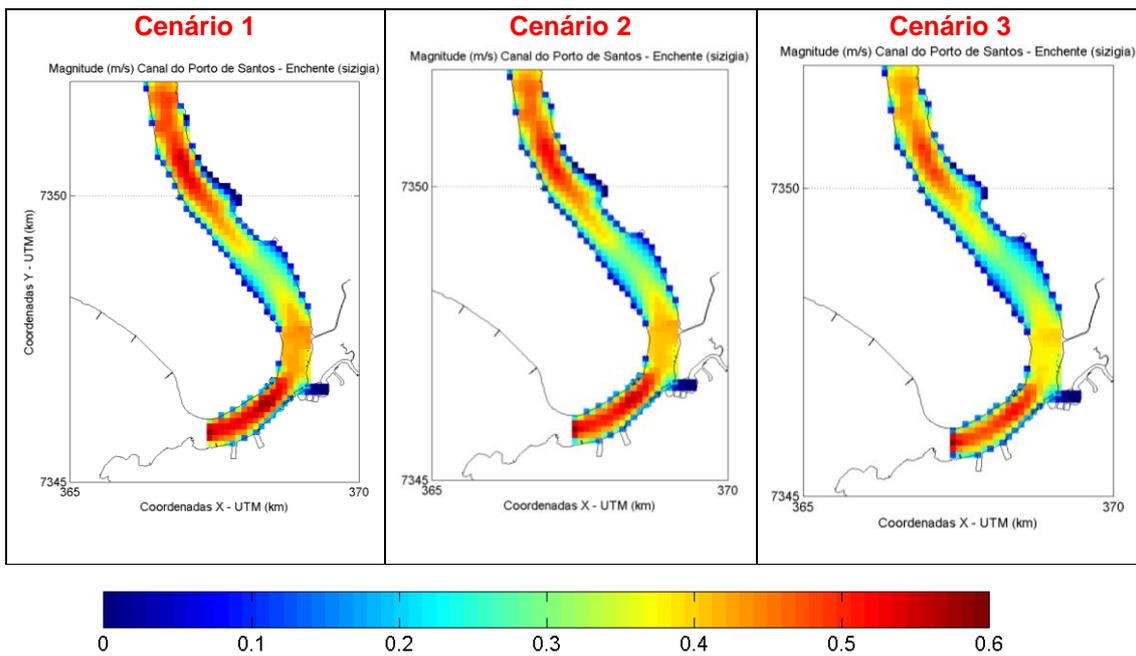
Ao observarmos a magnitude da corrente superficial nos canais do Porto de Santos e Bertioga (Figura 62 a Figura 65), durante os mesmos instantes de enchente e vazante, observa-se comportamento distinto do observado no Canal de São Vicente: há uma redução da magnitude da corrente com o aumento do nível do mar (do Cenário 1 para o Cenário 3).



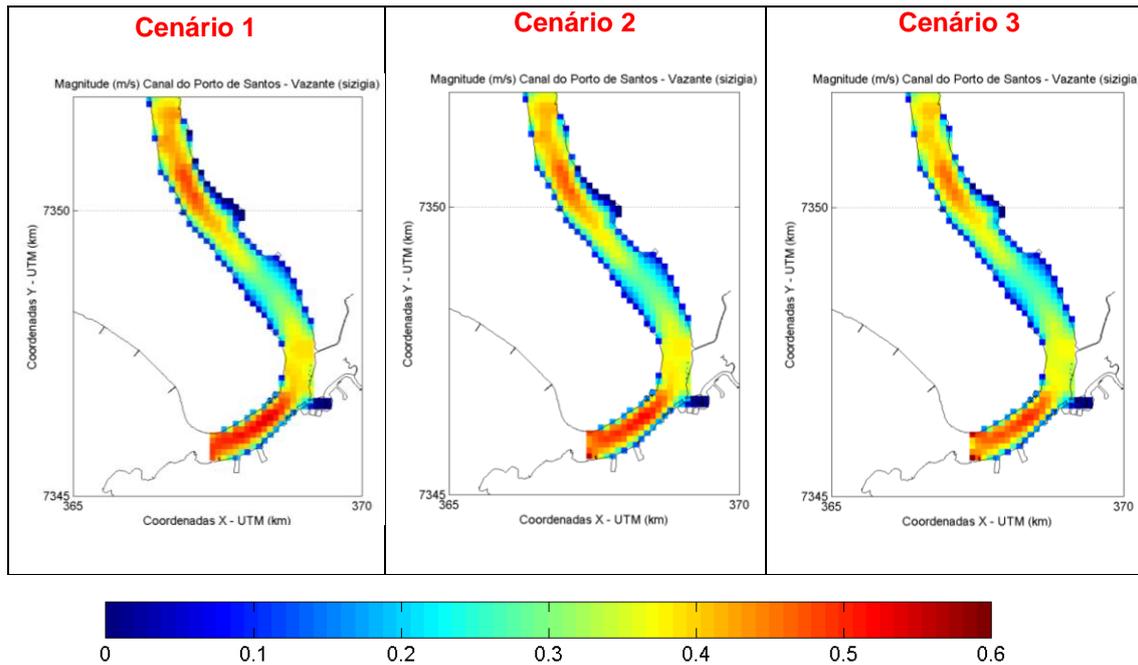
**Figura 60** - Magnitude das correntes superficiais para um instante de maré enchente, no Canal de São Vicente.



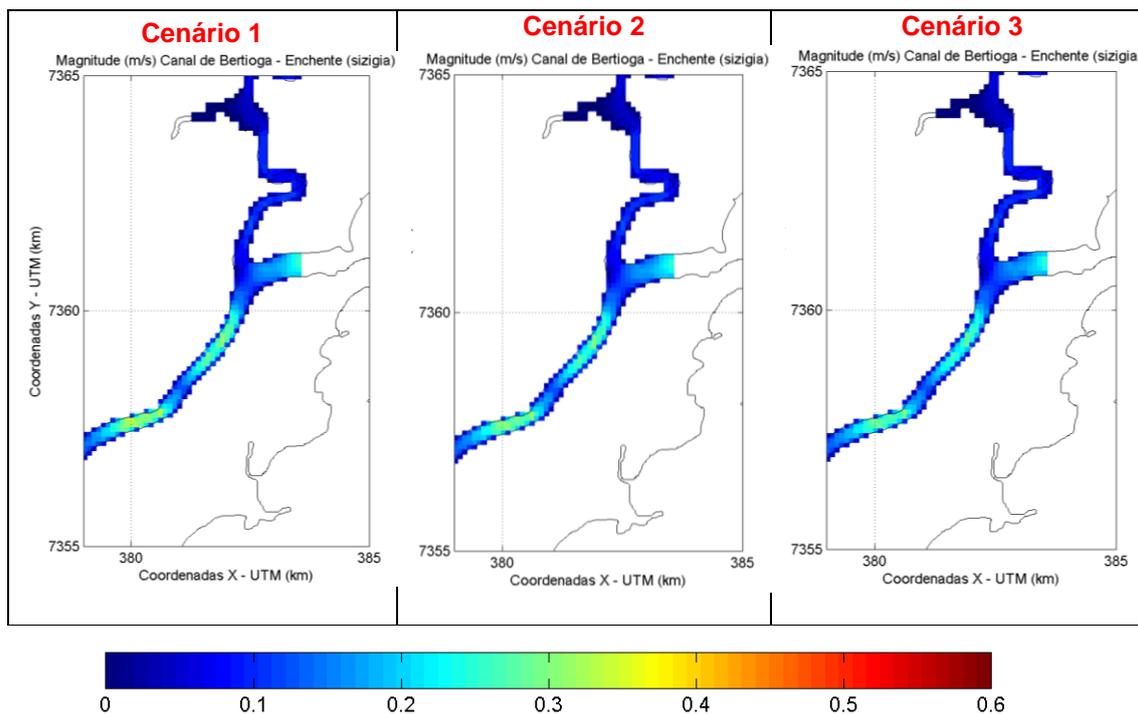
**Figura 61** - Magnitude das correntes superficiais para um instante de maré vazante, no Canal de São Vicente.



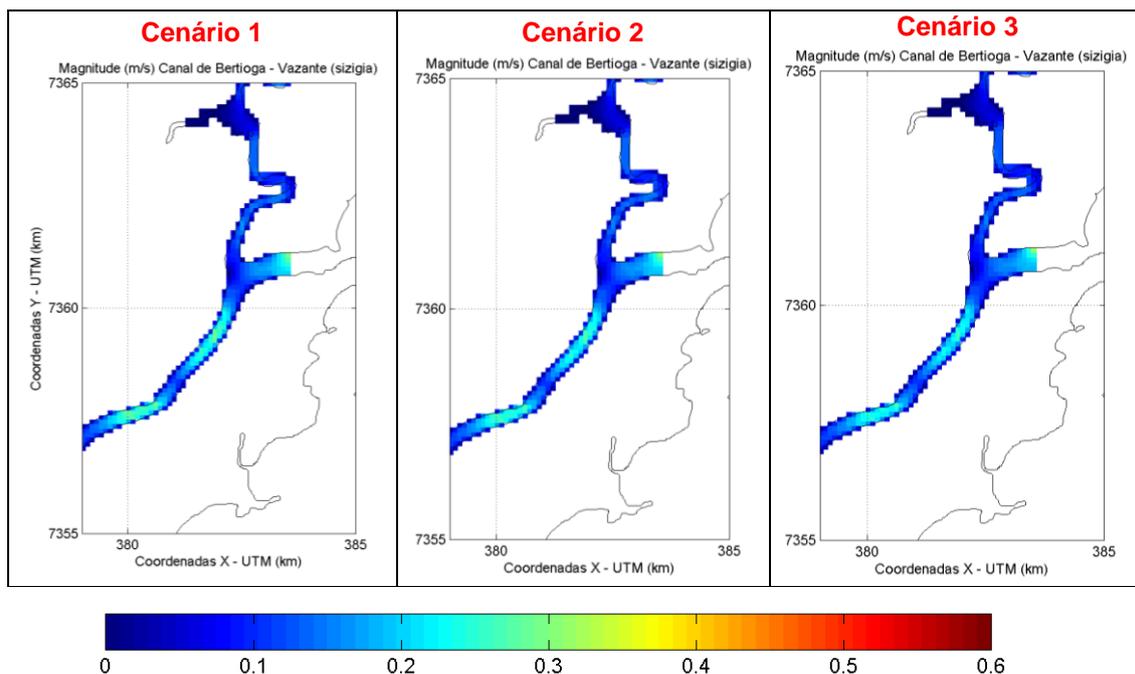
**Figura 62** - Magnitude das correntes superficiais para um instante de maré enchente, no Canal do Porto de Santos.



**Figura 63** - Magnitude das correntes superficiais para um instante de maré vazante, no Canal do Porto de Santos.

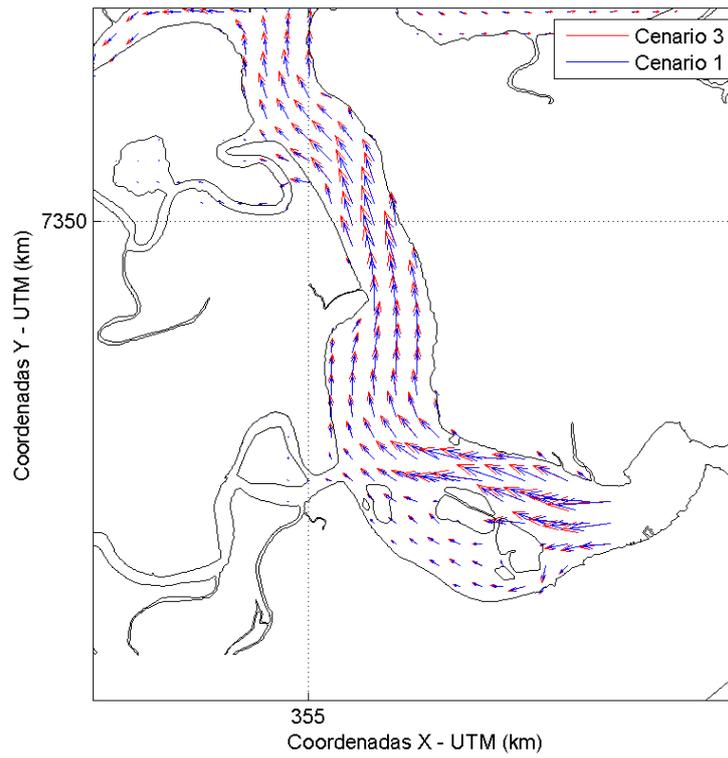


**Figura 64** - Magnitude das correntes superficiais para um instante de maré enchente, no Canal de Bertioga.

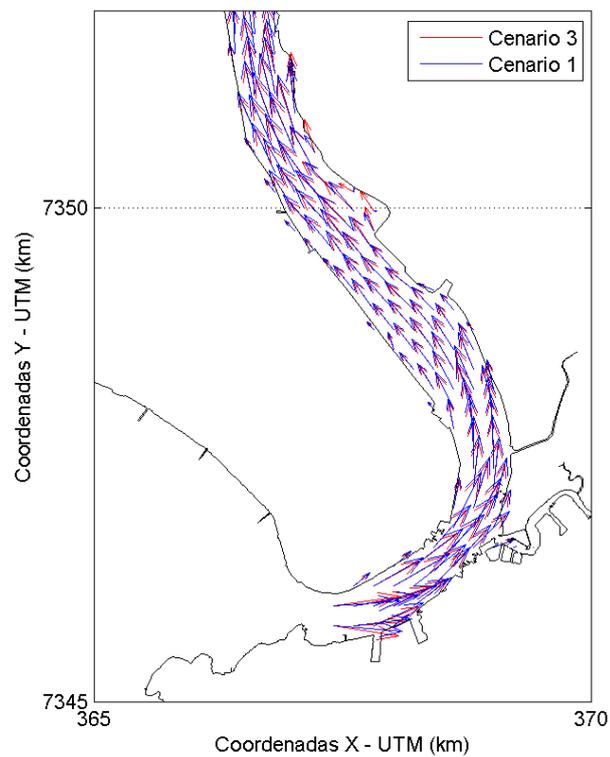


**Figura 65** - Magnitude das correntes superficiais para um instante de maré vazante, no Canal de Bertioga.

As figuras a seguir (Figura 66 e Figura 67) ilustram os vetores de corrente para instantes de maré enchente nos canais de São Vicente e do Porto de Santos, respectivamente. Em azul estão apresentados os vetores de corrente para o Cenário 1 e, em vermelho, os vetores para o Cenário 3. O tamanho dos vetores está diretamente relacionado com a sua magnitude. Na Figura 66 fica evidente que os vetores referentes ao Cenário 3 são maiores, e portanto mais intensos, do que os vetores referentes ao Cenário 1. Na Figura 67 pode-se observar uma diferença na direção dos vetores (indicada pela orientação dos mesmos) na entrada do canal. Além disso, são observados vetores vermelhos (indicativos do Cenário 3) em locais onde não há vetores azuis (indicativos do Cenário 1) - nas proximidades da coordenada 7350000, à direita. Isto ocorre devido às informações batimétricas desta região, onde as células encontram-se secas considerando o nível do mar do Cenário 1, e alagadas considerando a elevação do Cenário 3.



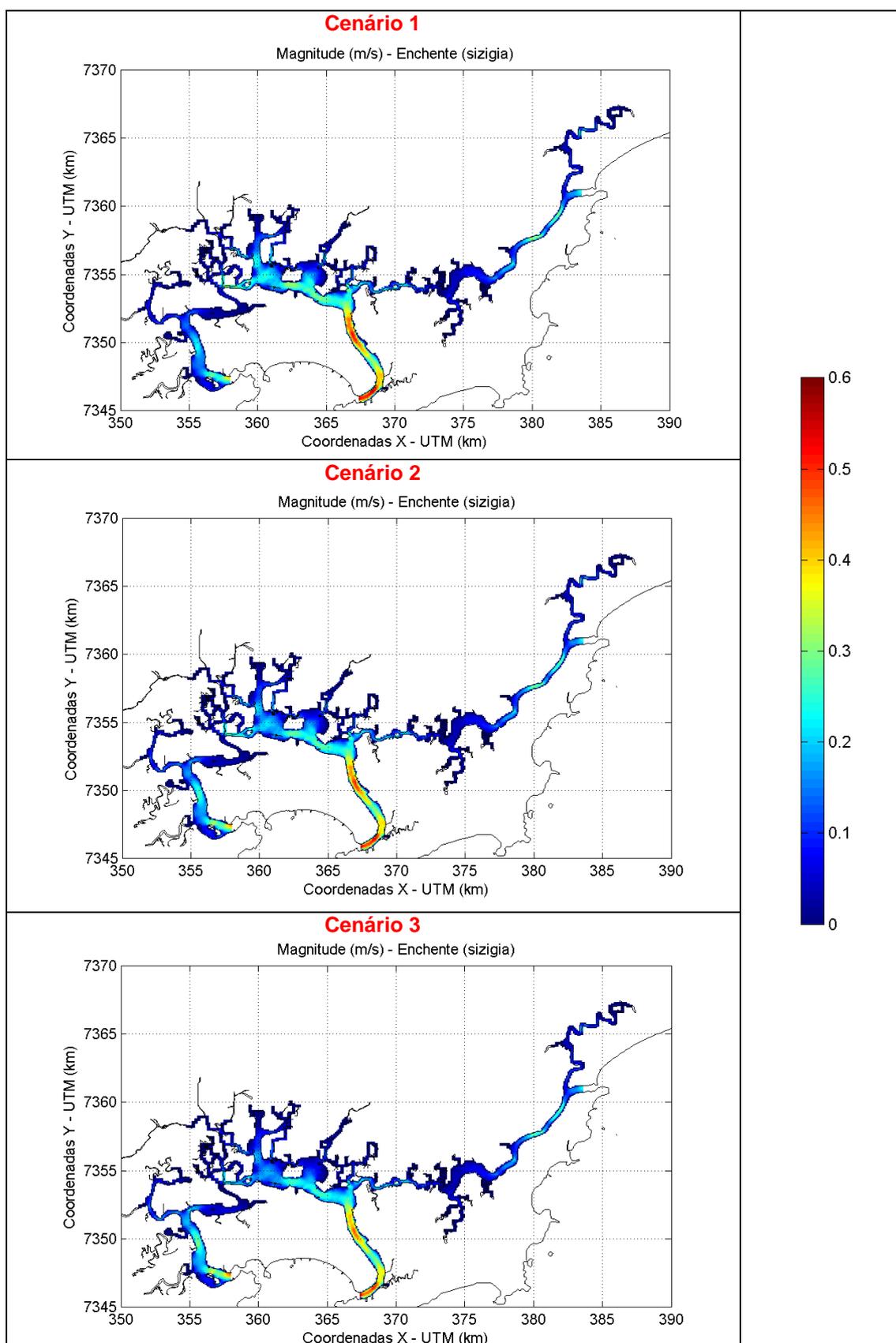
**Figura 66** - Vetores de correntes superficiais para um instante de maré enchente, no Canal de São Vicente.



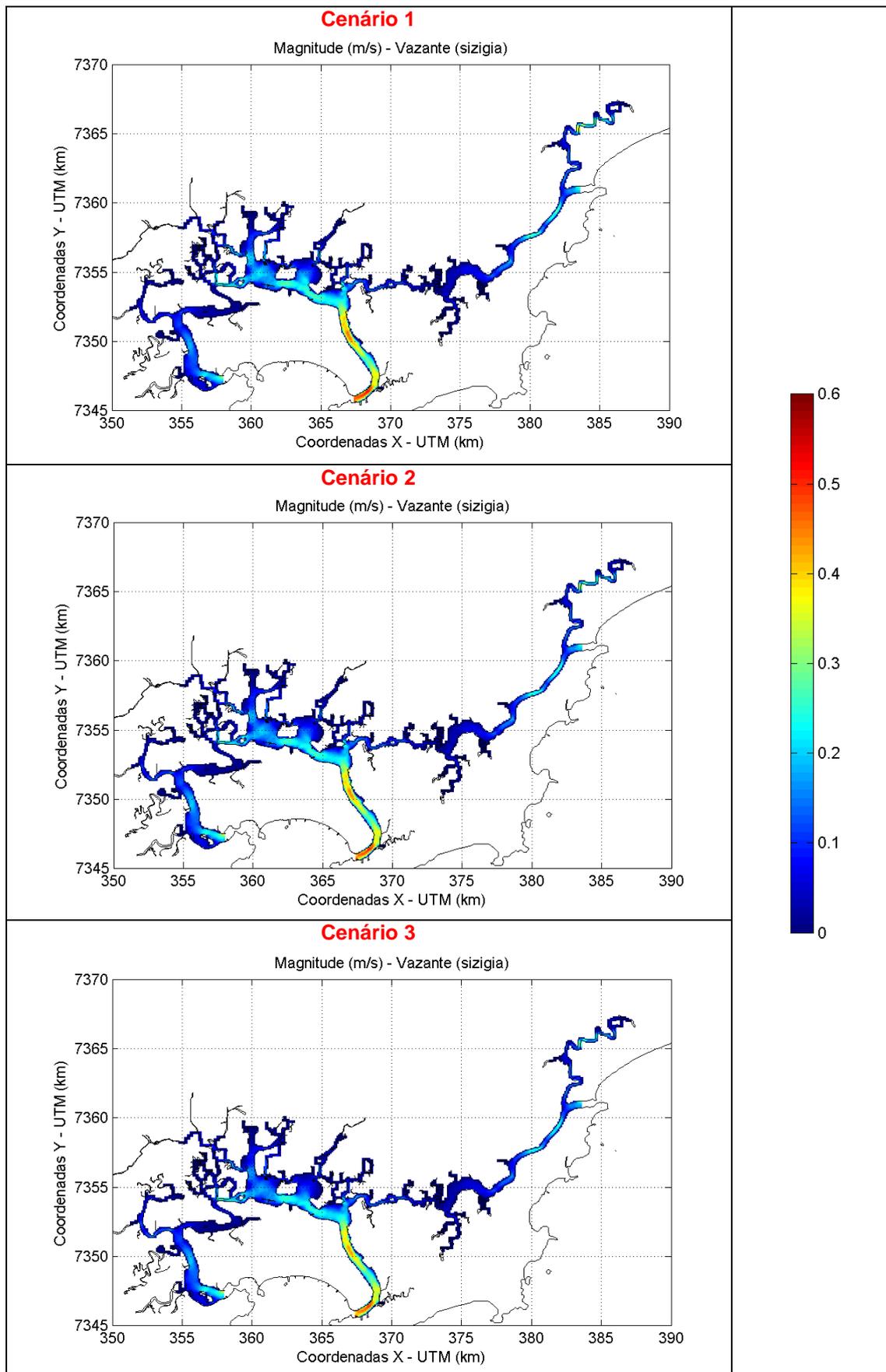
**Figura 67** - Vetores de correntes superficiais para um instante de maré enchente, no Canal do Porto de Santos.

Como o modelo hidrodinâmico utilizado considera camadas sigma, onde a superfície representa 10% da coluna d'água, ao forçar o modelo considerando um aumento da elevação do nível do mar, a camada superficial analisada nas comparações anteriores apresenta diferentes espessuras para os cenários 1, 2 e 3 analisados. Desta forma, apresenta-se a seguir uma comparação das velocidades da corrente, porém agora considerando a velocidade média na coluna d'água.

A Figura 68 apresenta a magnitude da corrente média na coluna d'água no Sistema Estuarino de Santos em um instante de maré enchente (sizígia), para os cenários 1, 2 e 3. De forma análoga, a Figura 69 apresenta a magnitude da corrente média na coluna d'água em um instante de maré vazante.

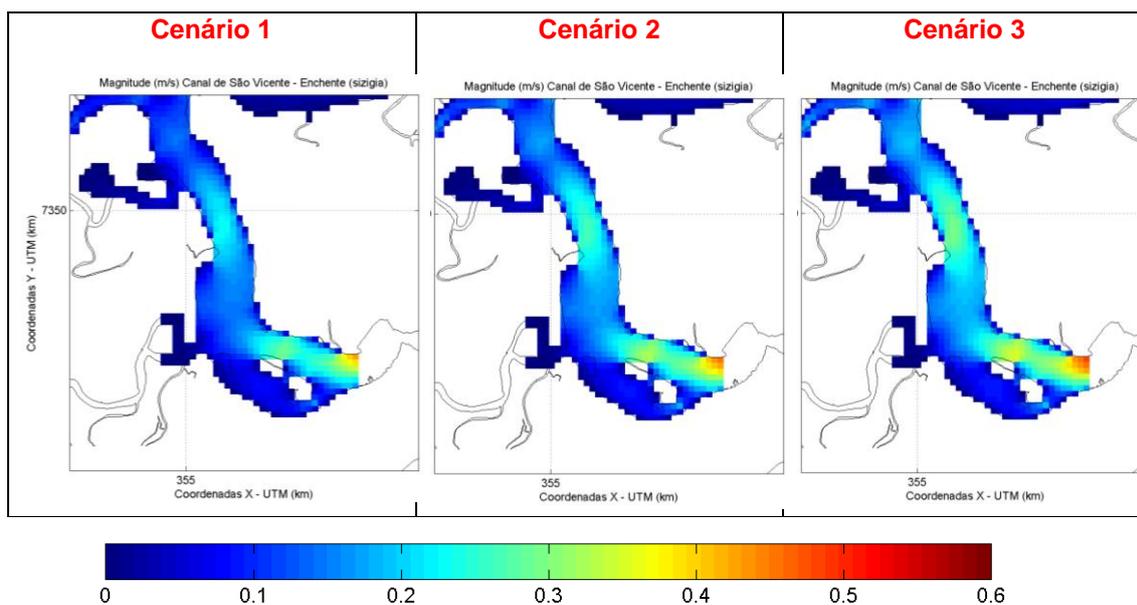


**Figura 68** - Magnitude da corrente média na coluna d'água para um instante de maré enchente.

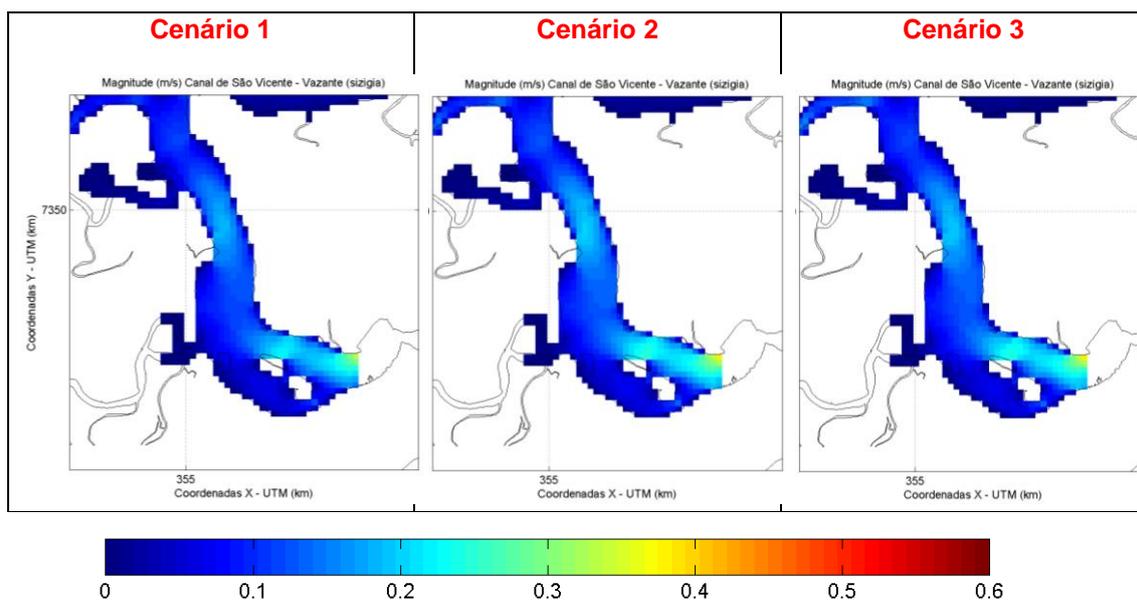


**Figura 69** - Magnitude da corrente média na coluna d'água para um instante de maré vazante.

A Figura 70 apresenta a magnitude da corrente média na coluna d'água para um instante de maré enchente, no Canal de São Vicente. Observa-se um aumento da magnitude da corrente em praticamente todo o Canal de São Vicente ao se considerar um aumento do nível do mar (do Cenário 1 para o Cenário 3). O mesmo pode ser observado durante uma maré vazante, através da Figura 71.

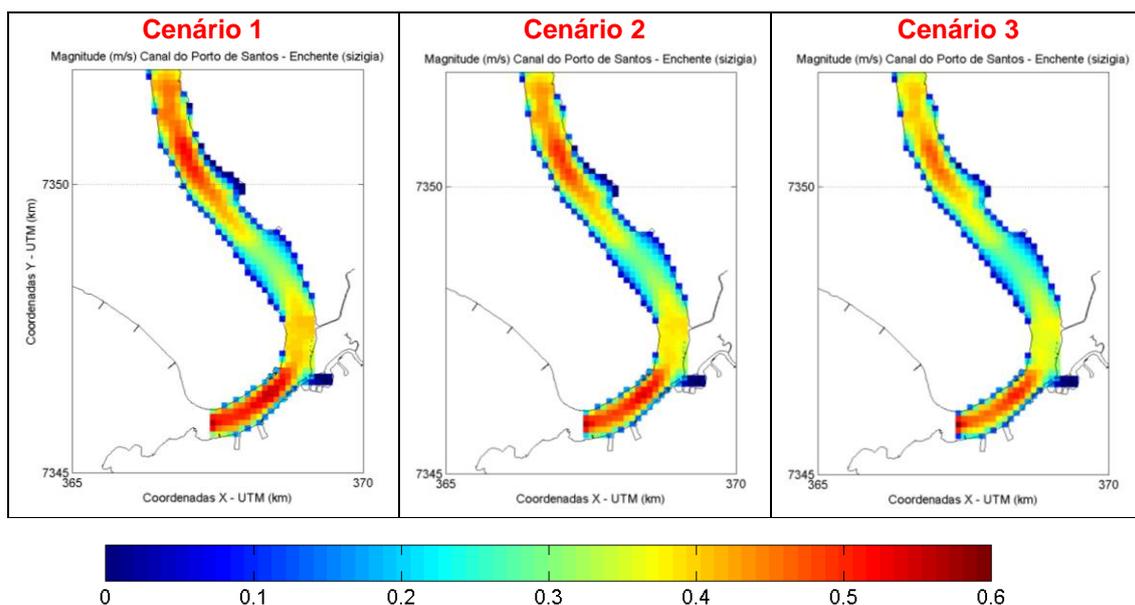


**Figura 70** - Magnitude da corrente média na coluna d'água para um instante de maré enchente, no Canal de São Vicente.

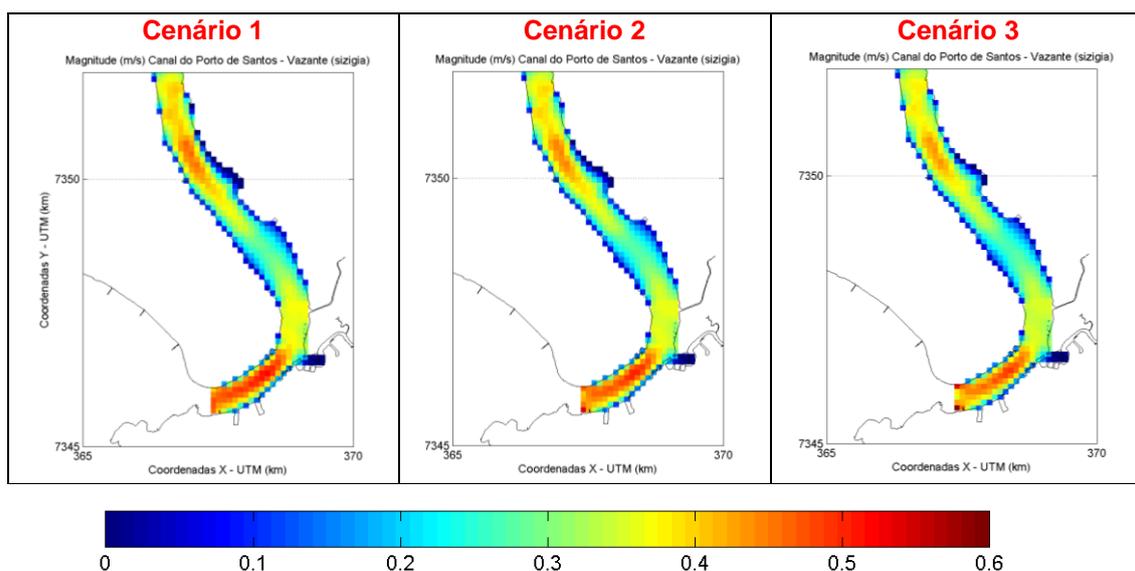


**Figura 71** - Magnitude da corrente média na coluna d'água para um instante de maré vazante, no Canal de São Vicente.

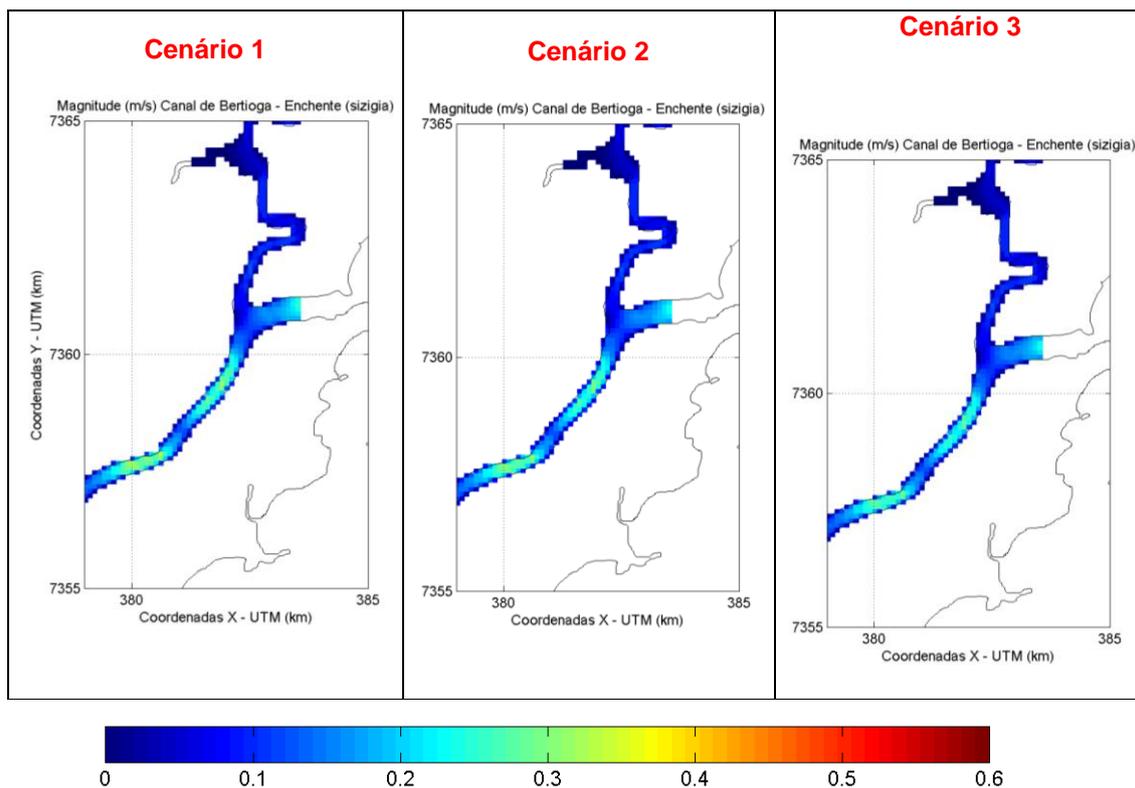
Ao observarmos a magnitude da corrente média na coluna d'água nos canais do Porto de Santos e Bertioga (Figura 72 a Figura 75) durante os mesmos instantes de enchente e vazante, observa-se comportamento distinto do observado no Canal de São Vicente: há uma redução da magnitude da corrente com o aumento do nível do mar (do Cenário 1 para o Cenário 3). Ou seja, ocorre o mesmo já observado ao analisar apenas a camada superficial.



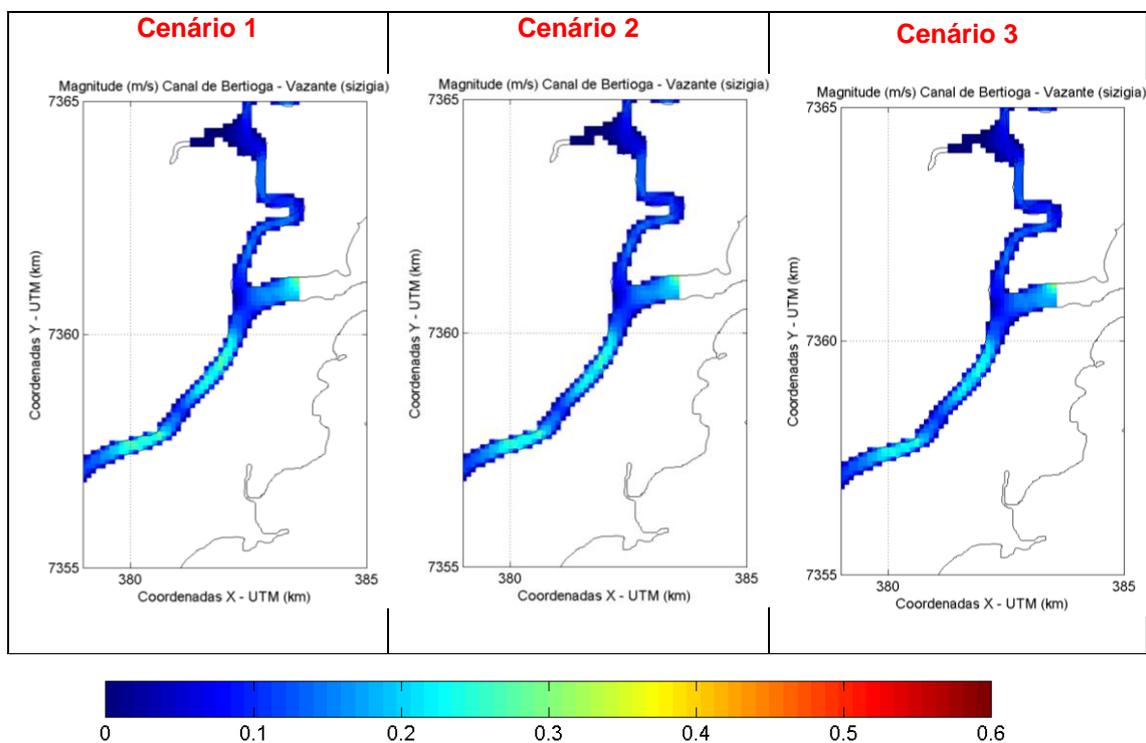
**Figura 72** - Magnitude da corrente média na coluna d'água para um instante de maré enchente, no Canal do Porto de Santos.



**Figura 73** - Magnitude da corrente média na coluna d'água para um instante de maré vazante, no Canal do Porto de Santos.

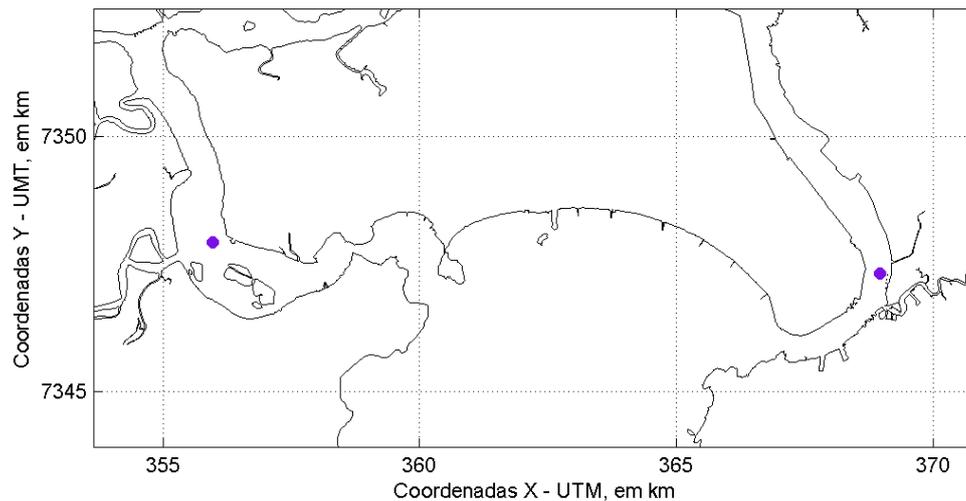


**Figura 74** - Magnitude da corrente média na coluna d'água para um instante de maré enchente, no Canal de Bertioga.



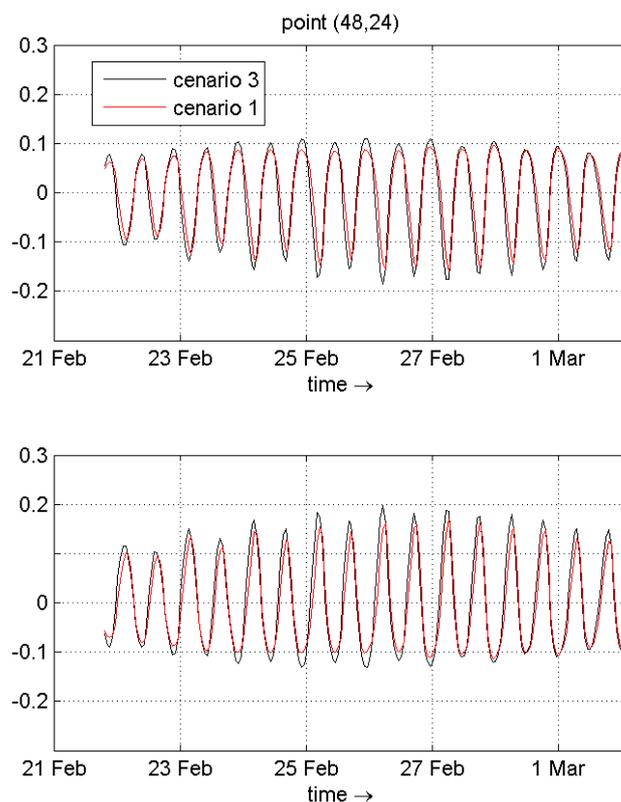
**Figura 75** - Magnitude da corrente média na coluna d'água para um instante de maré vazante, no Canal de Bertioga.

Como os resultados apresentados para os 3 cenários considerados apresentam apenas instantes de maré (enchente e vazante), a seguir são apresentadas séries temporais das componentes U (E-W) e V (N-S) da corrente, considerando os cenários 1 e 3, a fim de comparar a velocidade e direção da corrente ao longo do tempo, para dois pontos localizados nos canais de Santos e São Vicente, conforme ilustrado na Figura 76.



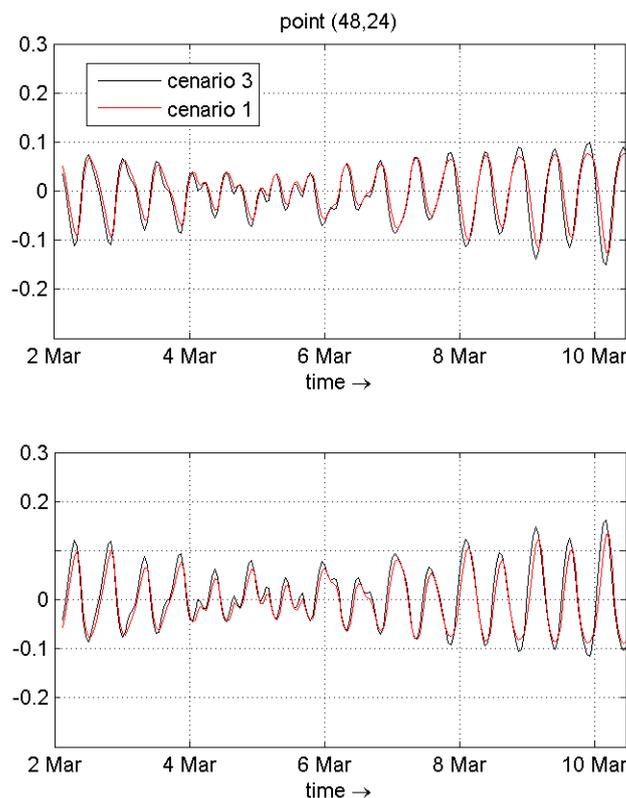
**Figura 76** – Localização dos pontos de comparação das séries temporais de corrente, nos canais de Santos e São Vicente.

Foram extraídas séries temporais de velocidade da corrente média na coluna d'água em um ponto localizado no Canal de São Vicente. A Figura 77 ilustra essas diferenças de velocidade durante um período de sizígia. Observa-se que o padrão direcional da corrente se mantém, ou seja, a inversão da corrente de acordo com a maré astronômica continua a ocorrer nos mesmos instantes. No entanto, observa-se que ambas componentes (U e V) no cenário 3 alcançam velocidades maiores do que no cenário 1, tanto na enchente quanto na vazante.



**Figura 77** – Componentes  $U$  e  $V$  da corrente média na coluna d'água (m/s) no Canal de São Vicente, considerando os cenários 1 e 3 testados durante um período de sizígia em 2013.

A Figura 78 ilustra as diferenças de velocidade entre os cenários 1 e 3 durante um período de quadratura. Observa-se que durante a quadratura a componente  $U$  é muito similar considerando os dois cenários, principalmente quando a componente  $U$  é positiva, ou seja, considerando a orientação do Canal de São Vicente isso indica situação de corrente vazante. Na componente  $V$ , observa-se que durante a vazante (componente  $V$  negativa, indicando sul), praticamente não são observadas diferenças significativas entre as duas séries temporais no período onde ocorrem as mínimas intensidades da quadratura.

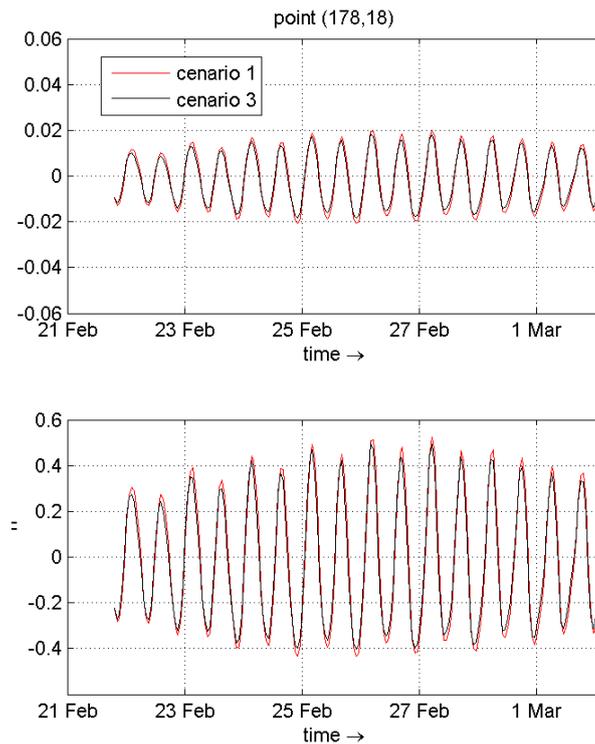


**Figura 78** – Componentes  $U$  e  $V$  da corrente média na coluna d'água (m/s) no Canal de São Vicente, considerando os cenários 1 e 3 testados durante um período de quadratura em 2013.

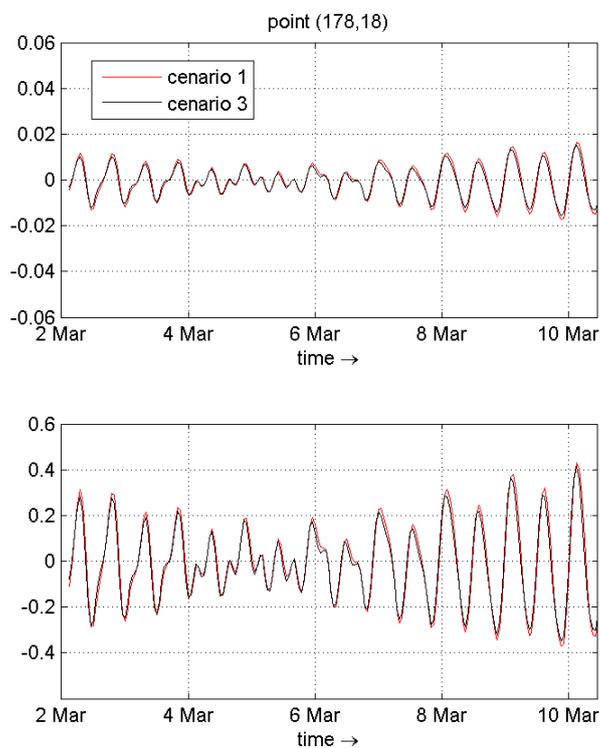
As mesmas análises foram realizadas para o Canal de Santos, já que as análises espaciais instantâneas mostraram comportamento distinto do observado no Canal de São Vicente. A seguir são apresentadas as figuras de séries temporais de velocidade da corrente média na coluna d'água para períodos de sizígia (Figura 79) e quadratura (Figura 80).

As séries temporais comprovam o que foi observado nos campos instantâneos. Ao considerarmos o aumento do nível do mar, observa-se redução na intensidade das componentes  $U$  e  $V$  da corrente. Isso ocorre tanto para o período de sizígia quanto para quadratura, no entanto a redução da intensidade é mais evidente durante a sizígia, quando as intensidades são maiores.

Ao avaliarmos o período de quadratura (Figura 80), nota-se que nos instantes de vazante (componente  $V$  negativa), não são observadas diferenças entre os dois cenários (1 e 3) no período onde ocorrem as mínimas intensidades da quadratura.

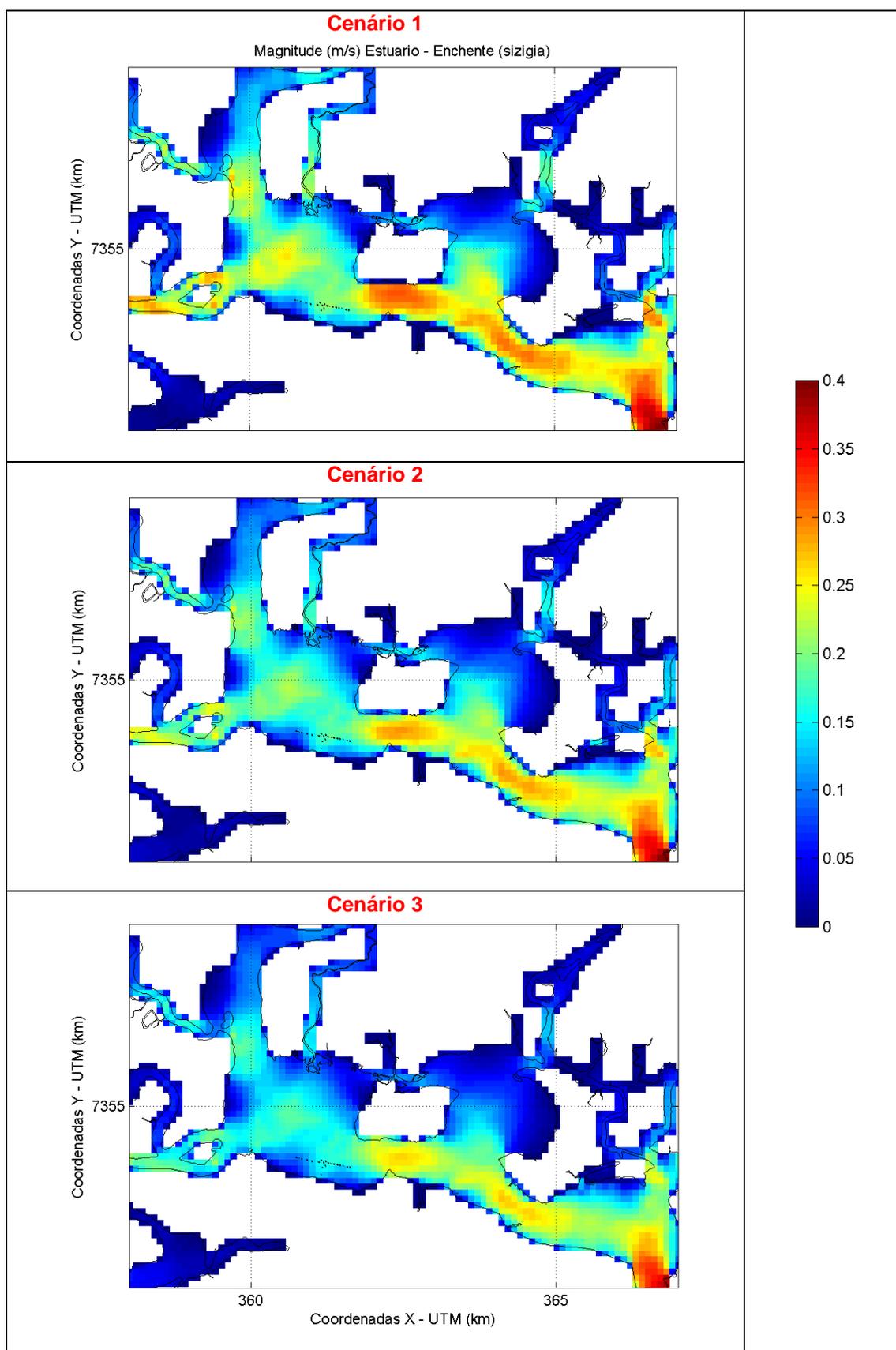


**Figura 79** – Componentes  $U$  e  $V$  da corrente média na coluna d'água (m/s) no Canal de Santos, considerando os cenários 1 e 3 testados durante um período de sizígia em 2013.

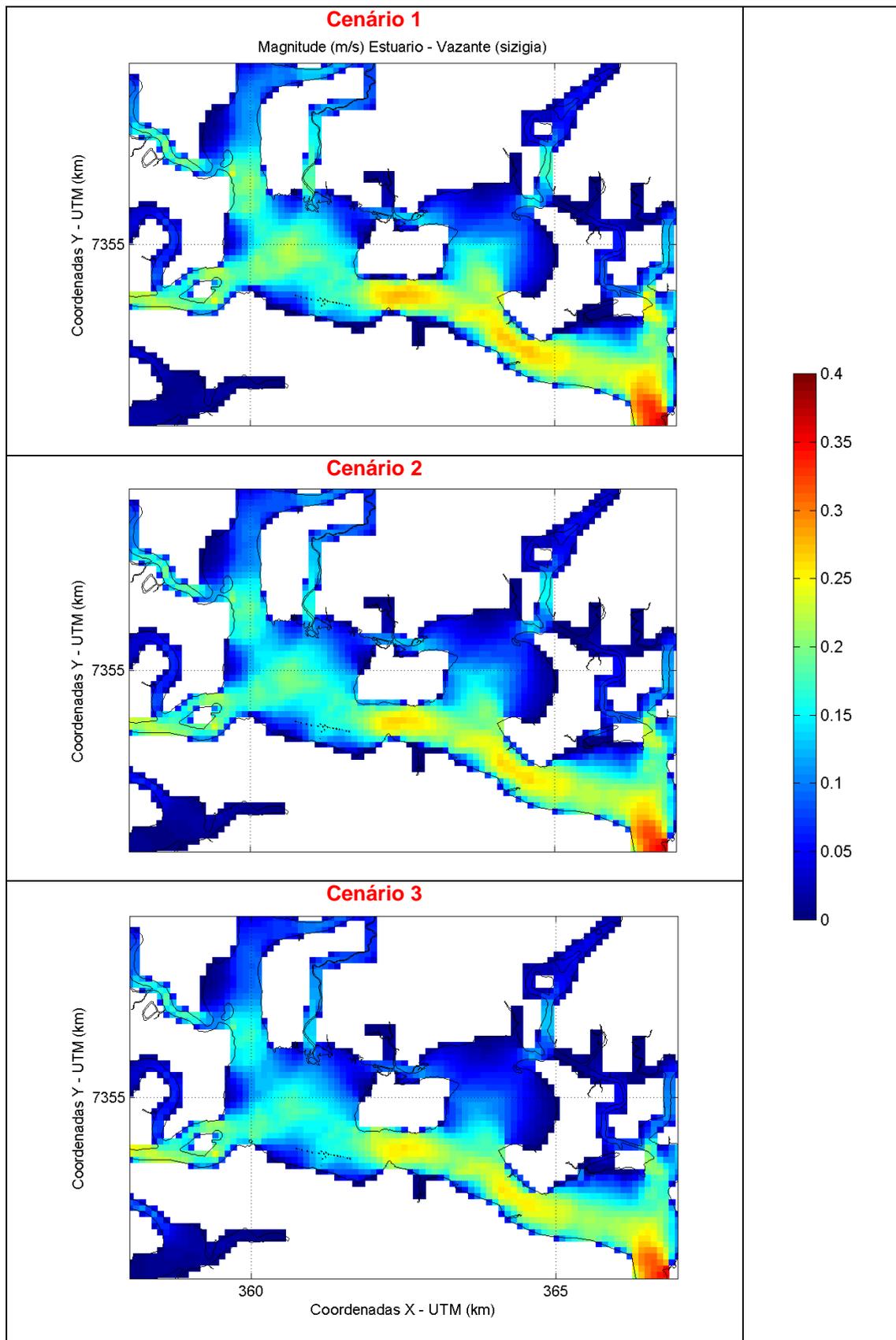


**Figura 80** – Componentes  $U$  e  $V$  da corrente média na coluna d'água (m/s) no Canal de Santos, considerando os cenários 1 e 3 testados durante um período de quadratura em 2013.

Comparações nos campos de velocidade foram também realizadas para a região interna do Estuário de Santos. Os resultados estão ilustrados na Figura 81 (instante de maré enchente) e Figura 82 (instante de maré vazante). No geral observa-se uma redução da velocidade da corrente com o aumento do nível do mar. As diferenças ficam mais nítidas no instante de maré enchente, pois as velocidades são superiores neste instante escolhido.

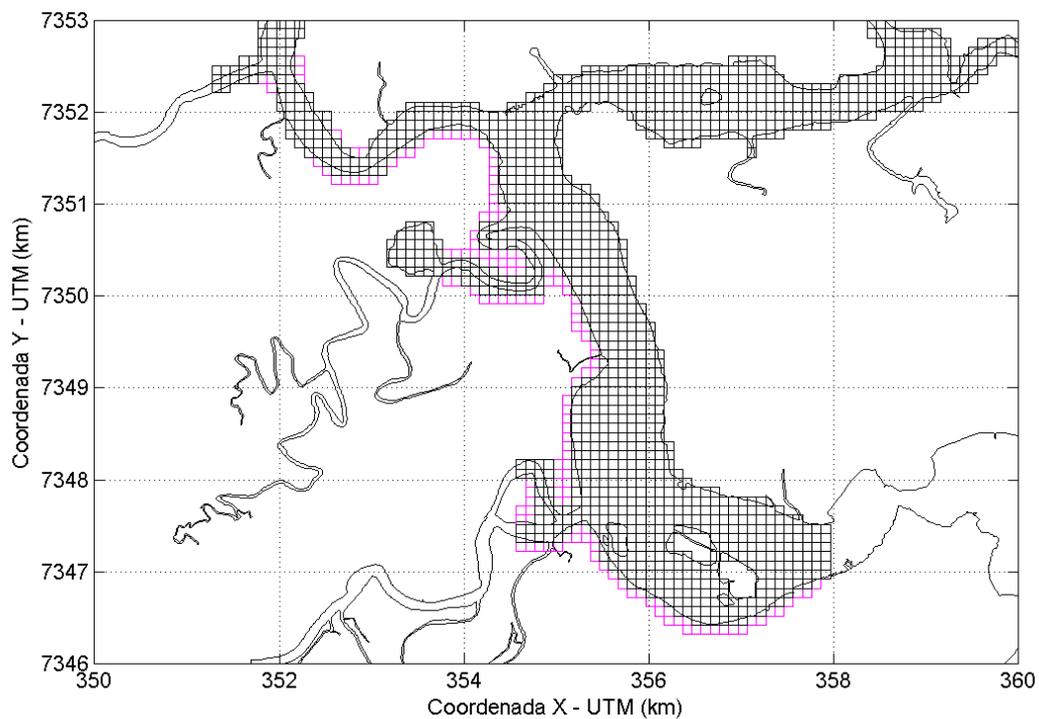


**Figura 81** - Magnitude das correntes médias na coluna d'água para um instante de maré enchente, no Estuário de Santos.



**Figura 82** - Magnitude das correntes médias na coluna d'água para um instante de maré vazante, no Estuário de Santos.

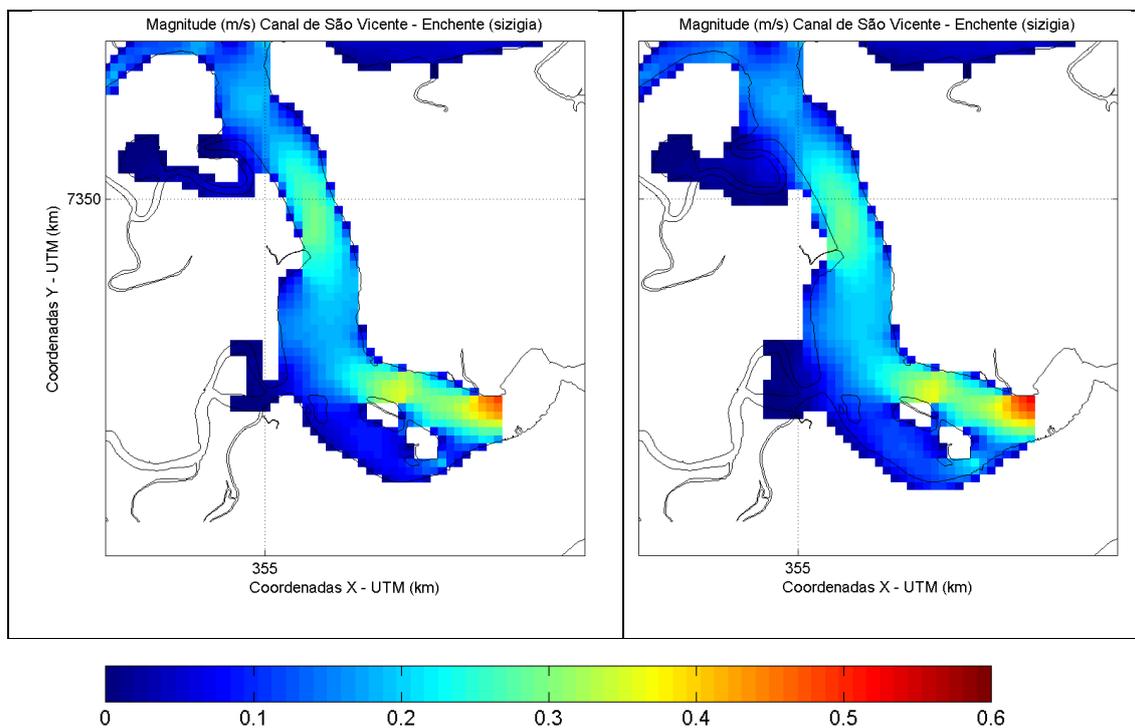
Conforme observado anteriormente, além de diferenças na intensidade da corrente e direção devido ao aumento do nível do mar, observam-se algumas regiões alagadas nos cenários futuros, que não se encontravam alagadas no cenário atual. Levando isso em consideração, uma nova simulação foi realizada, onde a grade numérica mais resolvida do modelo foi alterada: no lado oeste do Canal de São Vicente, na região ocupada por vegetação (e não urbanizada), foram acrescentadas células ao modelo e inseridas cotas batimétricas acima do nível do mar. As duas grades estão sendo apresentadas na Figura 83: Grade 04 e Grade 04 ampliada na porção oeste do Canal de São Vicente. O objetivo é avaliar como o aumento da área alagada pode alterar o padrão de circulação da região.



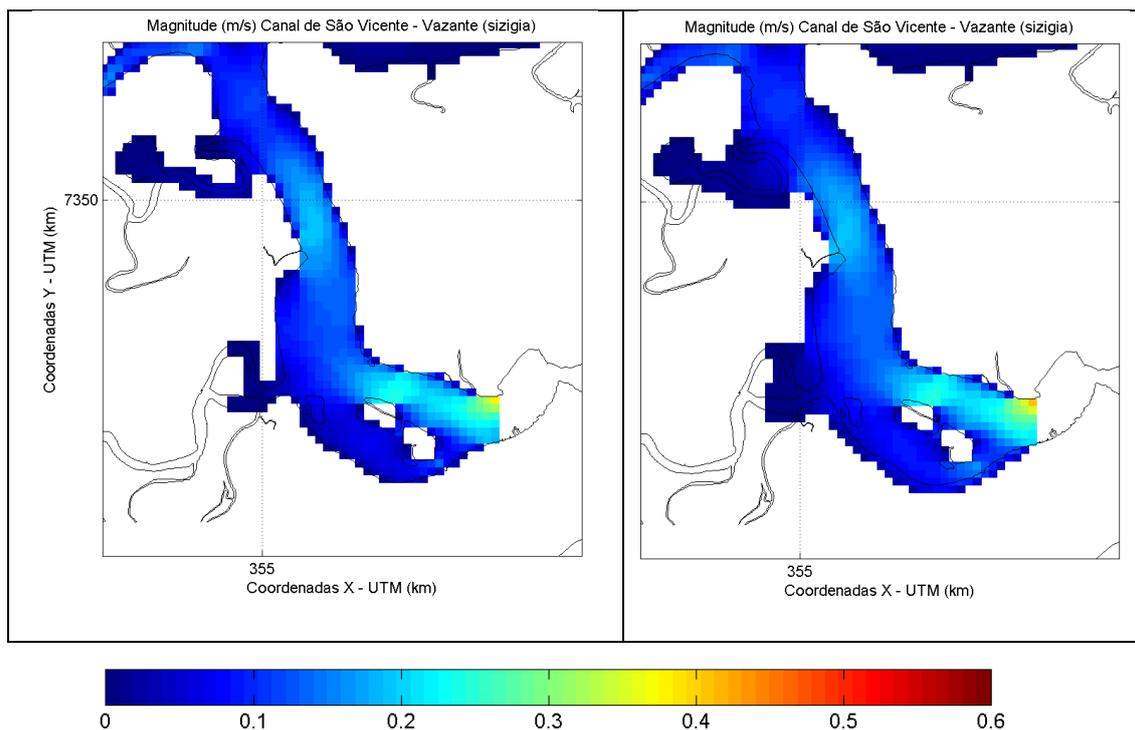
**Figura 83** – Grade 04 (em preto) e Grade 04 ampliada (em rosa) na parte oeste do Canal de São Vicente.

A Figura 84 apresenta um instante da magnitude da corrente (em m/s) durante a maré enchente, para o Canal de São Vicente, considerando o Cenário 3. O painel esquerdo apresenta a Grade 04 original (utilizada até então em todos os cenários). O painel direito apresenta a Grade 04 com as células adicionais na

porção oeste (Grade 04 ampliada). A Figura 85 apresenta os mesmos resultados para um instante de maré vazante. No geral, não são observadas diferenças significativas entre a velocidade dos dois resultados, exceto pela região mais próxima a borda do modelo. No entanto, como era se se esperar, observam-se mais células alagadas no painel direito (Grade 04 ampliada).

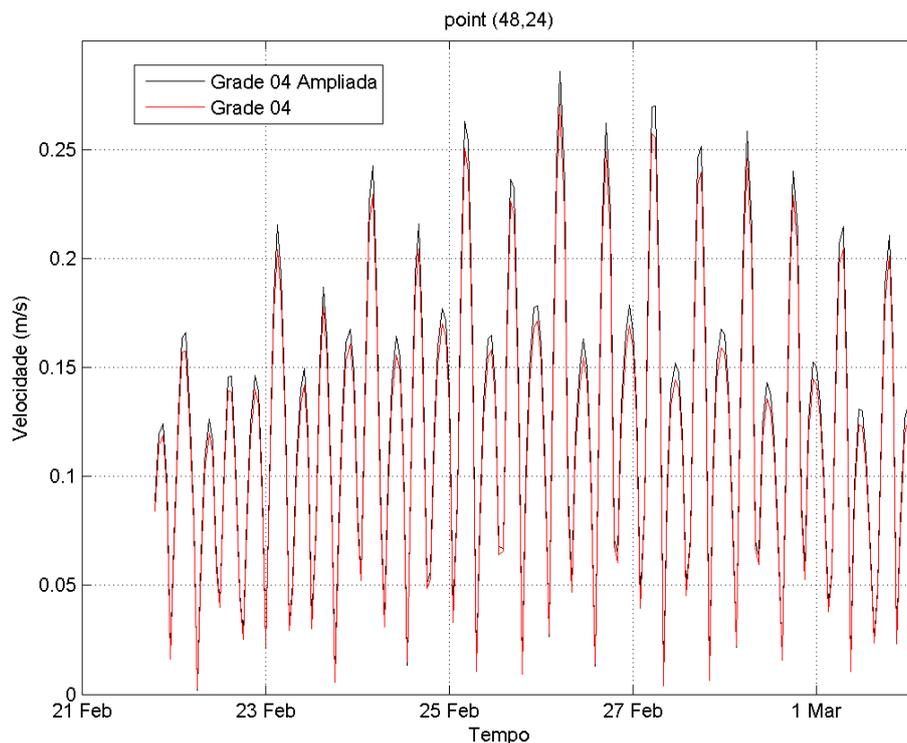


**Figura 84** - Magnitude da corrente média na coluna d'água para um instante de maré enchente, no Canal de São Vicente. Ambos painéis apresentam o resultado para o Cenário 3. O painel esquerdo apresenta a Grade 04 original e o painel direito, a Grade 04 ampliada.

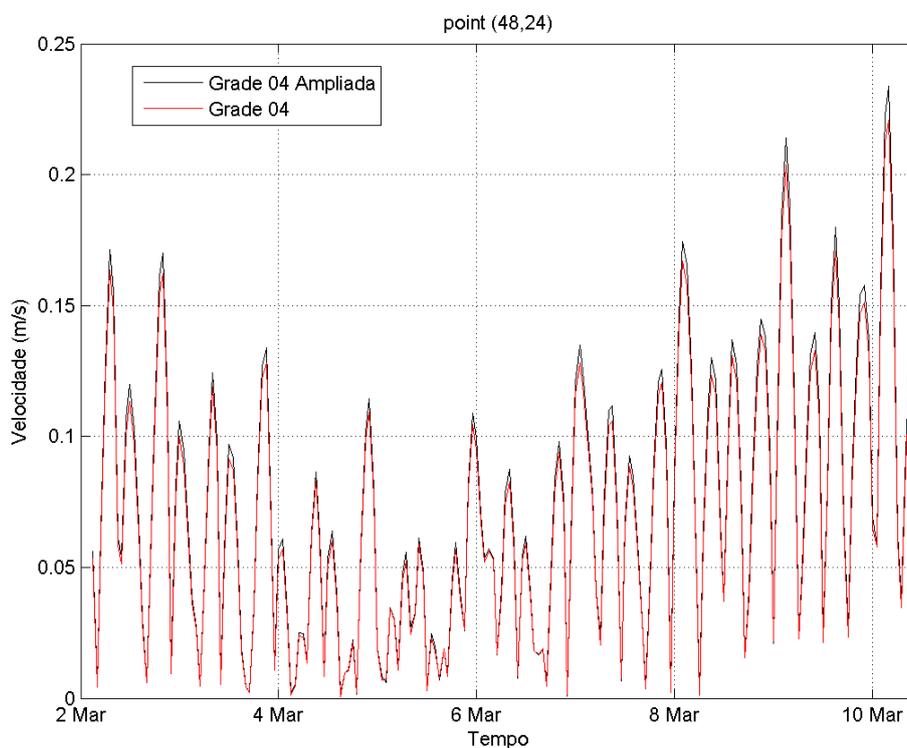


**Figura 85** - Magnitude da corrente média na coluna d'água para um instante de maré vazante, no Canal de São Vicente. Ambos painéis apresentam o resultado para o Cenário 3. O painel esquerdo apresenta a Grade 04 original e o painel direito, a Grade 04 com células adicionais na porção oeste.

Ao extrairmos as séries temporais de magnitude (Figura 79 e Figura 87) para o mesmo ponto avaliado anteriormente no Canal de São Vicente (Figura 76), pode-se observar que ao considerarmos a Grade 04 ampliada na porção oeste, no ponto avaliado a intensidade da corrente é superior à observada no Cenário 3 considerando a Grade 04 original. Este aumento da intensidade é verificado tanto durante a sizígia (Figura 79) quanto durante a quadratura (Figura 87). No entanto, as diferenças são mais evidentes ao considerarmos a sizígia, quando ocorrem as maiores intensidades da corrente. Já na quadratura, quando observam-se as menores intensidades da corrente, as diferenças são quase imperceptíveis na escala apresentada.



**Figura 86** – Magnitude da corrente média na coluna d'água (m/s) no Canal de São Vicente, considerando o cenário 3, com a Grade 04 e Grade 04 ampliada, durante um período de sizígia em 2013.



**Figura 87** – Magnitude da corrente média na coluna d'água (m/s) no Canal de São Vicente, considerando o cenário 3, com a Grade 04 e Grade 04 ampliada, durante um período de quadratura em 2013.

## 4. DISCUSSÃO

A maré no Sistema Estuarino de Santos pode ser classificada como mista, predominantemente semidiurna, de acordo com a análise dos dados medidos em campo (Figuras 11 a 16, Tabelas 5 a 7), das previsões realizadas a partir das constantes harmônicas da FEMAR (Figuras 38 e 39) e dos resultados gerados pelo modelo hidrodinâmico.

Através do espectro de amplitudes observa-se a predominância das componentes harmônicas semidiurnas, evidenciadas pelo pico na faixa de frequência de 2 ciclos por dia (Figuras 12, 14 e 16). A principal constante harmônica é a M2, seguida da S2, para as cinco estações analisadas (Tabelas 5 a 7). Nas estações onde houve medição de dados observa-se também uma importante contribuição de efeitos atmosféricos, através das oscilações de baixa frequência no nível médio (Figuras 11, 13 e 15).

A partir da observação geral dos resultados gerados pelo modelo hidrodinâmico para a condição atual do Sistema Estuarino observa-se uma intensificação das correntes nas regiões dos canais de Santos, São Vicente e Bertioga. De todo o domínio, para os instantes analisados, o Canal do Porto de Santos apresenta as velocidades mais intensas. Durante as marés de sizígia as velocidades são mais intensas.

Através da análise dos dados medidos pelo LDC (dados pontuais), as correntes oscilam de acordo com a orientação do canal nos três pontos analisados: eixo NE-SW no ADCP de Santos, ENE-WSW nos ADCPs de São Vicente e de Bertioga (Figura 17 à Figura 37). Em todos os pontos avaliados, na superfície há maior predomínio das correntes de vazante e junto ao fundo predominam as correntes de enchente, como era de se esperar devido à influência fluvial somada à da maré. Observa-se que as correntes alcançam velocidades superiores durante a maré vazante nos três pontos avaliados, devido à menor fricção no fundo com o aumento da coluna d'água.

Foram comparados os resultados de elevação gerados pelo modelo hidrodinâmico com previsões harmônicas de maré, realizadas a partir de constantes harmônicas da FEMAR para as estações Porto de Santos (Figura 40) e Ilha Barnabé (Figura 41). O modelo também foi avaliado utilizando os dados

de elevação e correntes medidos em campo pelo LDC/IO/USP (Figuras 42 e 48), além de dados disponibilizados pela CODESP (Figura 53).

Observou-se que o modelo conseguiu representar de forma coerente a amplitude e afase da maré na região de estudo, considerando tanto as previsões harmônicas realizadas quanto os dados de elevação medidos em campo.

De todos os índices utilizados para avaliar o modelo, o que gerou os menores erros foi o *Index of Agreement* (IOA), para o qual obteve-se 98% de acerto para as estações da FEMAR, 96% ao comparar com os dados do LDC Santos, 94% com os dados da CODESP e 92% ao comparar com os dados do LDC São Vicente. No entanto, vale ressaltar que apesar dos menores índices obtidos, as condições de elevação da superfície do mar ilustradas nas Figuras 42, 48 e 53 são mais complexas do que as observadas nas Figuras 40 e 41, pois apresentam variações no nível médio decorrentes de efeitos atmosféricos, e tais variações foram capturadas pelos modelos.

De acordo com Walstra et al (2001), utilizando o parâmetro RMAE é possível qualificar o resultado, de acordo com o valor encontrado ao comparar as duas séries temporais (dado e modelo). Para as comparações realizadas entre os resultados do modelo e previsões harmônicas utilizando as constantes harmônicas da FEMAR (Barnabé e Porto) podemos avaliar o modelo como bom, uma vez que obteve-se 28 para ambas estações (classifica-se como bom um valor entre 20 e 40). Ao compararmos os resultados do modelo com os dados medidos em campo pelo LDC na estação Santos, o modelo pode ser considerado bom/razoável (obteve-se o valor de 40) e ao comparar com os dados da CODESP e dados medidos pelo LDC na estação São Vicente, os resultados são razoáveis (entre 40 e 70).

De acordo com Harari & Camargo (1995, 1998) e Harari, Camargo & Cacciari (1999), na ausência de efeitos meteorológicos significativos, a circulação da região pode ser praticamente explicada pela maré astronômica. Porém, efeitos meteorológicos extremos, como por exemplo frentes frias, geram circulações e variações do nível do mar com a mesma ordem de grandeza dos efeitos da maré. Esta informação foi comprovada no presente estudo, ao implementarmos um modelo forçado apenas com constantes harmônicas de maré (sem considerar a elevação e correntes do HYCOM nas bordas). Ao avaliar os resultados dos modelos, Figuras 43 [a] e 42 [b] (um forçado [a] apenas com

maré astronômica e o outro [b] com maré astronômica, elevação e correntes tridimensionais do HYCOM), observa-se que o o modelo [b] representou os aumentos e reduções do nível do mar observadas no dado medido, enquanto que o modelo [a] não capturou estes efeitos.

Os parâmetros utilizados para avaliar os modelos comprovaram a importância de se utilizar os resultados de um modelo de maior escala para forçar um modelo de menor escala (ver Tabela 18): para todos os parâmetros utilizados, os erros foram inferiores considerando o modelo [b] forçado com maré astronômica, elevação e correntes tridimensionais do HYCOM do que considerando o modelo [a] forçado apenas com maré astronômica.

Avaliando as correntes geradas através da modelagem, no ADCP de Santos o modelo que considera salinidade e temperatura como forçantes representa melhor a corrente superficial, de acordo com todos os parâmetros testados (Tabela 18). Isto indica a importância de se considerar estas variáveis para correta representação da circulação no Sistema Estuarino de Santos. Para a camada de fundo e para o ADCP de São Vicente não se tem uma conclusão sobre a melhor configuração adotada através da análise dos parâmetros testados (ora os erros são maiores considerando TS, ora não).

No entanto, as correntes médias na coluna d'água geradas para ambos modelos (com e sem TS) foram comparadas e não foram observadas diferenças entre as duas rodadas (barotrópica e baroclínica). Sendo assim, para evitar desperdícios de tempo computacional, para os cenários futuros testados não foram utilizadas as forçantes salinidade e temperatura.

Infelizmente a Grade 04 (de maior resolução – Figura 3 e Tabela 2) não pôde ser utilizada no processo de validação dos dados medidos, pois seus limites encontram-se muito próximos dos pontos de medição. Assim, acredita-se que os resultados de validação da corrente poderiam ter um erro menor se considerássemos uma grade mais resolvida nos pontos de interesse, já que a Grade 03 tem resolução média de 300 metros.

Utilizando as informações disponíveis no quinto relatório de avaliação do IPCC – AR5, a partir do modelo validado (Cenário 1), outros cenários foram implementados, com o intuito de avaliar a dinâmica do Sistema Estuarino de Santos em resposta às projeções realizadas: O Cenário 2 considera 0,5 m de aumento e o Cenário 3 considera 1,0 m.

Ao considerar o aumento do nível do mar (cenários 2 e 3) observa-se alteração na velocidade da corrente ao longo do domínio implementado (Figuras 58, 59, 68 e 69), mais evidente durante a sizígia. A partir da vista geral dos resultados, observa-se que no Canal do Porto de Santos continuam ocorrendo as máximas intensidades da corrente. Além disso, as máximas velocidades continuam a ocorrer durante a maré vazante. Na quadratura e durante a maré vazante não são observadas diferenças significativas entre as duas séries temporais (cenários 1 e 3), no período onde ocorrem as mínimas intensidades da corrente (Figuras 78 e 80).

Na região interna do Estuário de Santos observa-se, no geral, uma redução da velocidade da corrente com o aumento do nível do mar (Figuras 81 e 82). As diferenças ficam mais nítidas no instante de maré enchente, pois as velocidades são superiores neste instante escolhido para apresentação.

Com o aumento do nível do mar observa-se um aumento da magnitude da corrente (tanto superficial quanto corrente média na coluna de água) em praticamente todo o Canal de São Vicente (Figuras 60 e 61). Comportamento distinto foi observado nos canais do Porto de Santos (Figuras 62 e 63) e Bertioga (Figuras 64 e 65) durante os mesmos instantes de enchente e vazante, ocorrendo redução da magnitude da corrente com o aumento do nível do mar (do Cenário 1 para o Cenário 3).

Além de observadas diferenças na magnitude das correntes entre os diferentes cenários, algumas células consideradas secas no Cenário 1 (devido aos dados de profundidade) passam a estar alagadas no Cenário 3 (passando a apresentar resultados de corrente, Figura 67).

Estudos realizados por Prandle et al. (2015) investigaram efeitos do aumento do nível do mar devido à mudanças climáticas em diversos estuários. Os autores observaram que em regiões profundas, impactos de um aumento de 1 m no nível do mar na corrente de maré podem ser desprezados. No entanto, em regiões rasas, um aumento de 1 m no nível pode causar um aumento de mais de 5% nas correntes e mais de 20% na dissipação da maré, e isto leva a alterações na distribuição dos sedimentos superficiais.

Considerando que um aumento do nível do mar acarretará no alagamento de regiões que encontram-se emersas no Cenário 1, foram realizadas novas simulações utilizando uma nova grade, ampliada na região de vegetação à oeste

do Canal de São Vicente, com o intuito de observar se ocorreriam alterações adicionais nos padrões de corrente (Figura 83). Apesar de não se dispor de uma topografia da região que passou a ser considerada na Grade 04 ampliada, utilizou-se um valor uniforme de 1 metro acima do zero. No ponto localizado no Canal de São Vicente (avaliado anteriormente) observou-se um aumento da intensidade da corrente, tanto durante a sizígia quanto a quadratura (Figuras 86 e 87). As diferenças são mais evidentes durante a sizígia, quando ocorrem as maiores intensidades da corrente.

De maneira geral, processos erosivos tendem a ocorrer em regiões em que a intensidade do fluxo hidrodinâmico sofre acréscimo e, processos deposicionais, em regiões onde há decréscimo do fluxo hidrodinâmico. Sendo assim as alterações hidrodinâmicas observadas devido aos cenários testados podem levar a processos erosivos e processos deposicionais.

De acordo com Afonso (2006) as áreas onde ocorre maior deposição dos sedimentos e conseqüente assoreamento são preferencialmente as áreas mais largas, onde há redução na velocidade das correntes, como o Mar Pequeno e os largos do Canéu e de Santa Rita. De acordo com as análises espaciais, nestas regiões internas observou-se uma redução da intensidade da corrente, o que pode acarretar em um maior assoreamento destas regiões, levando a manutenções mais frequentes das cotas batimétricas.

Muitos fatores devem ser levados em conta ao avaliar os efeitos de mudanças nas condições forçantes em uma região costeira. O presente estudo se ateve à variável elevação do nível do mar, e avaliou a alteração no padrão de correntes, considerando diferentes taxas de aumento de acordo com o quinto relatório do IPCC AR5.

Não foram considerados outros fatores, tais como a alteração da circulação com base na variação da salinidade, variação das vazões dos rios, padrões de circulação atmosféricos, ondas incidentes, aumento de eventos extremos e conseqüentes alterações batimétricas, entre outros.

Sugerimos que este estudo seja utilizado como instrumento para ampliação do conhecimento, com aprofundamento em outras áreas, possibilitando melhor gerenciamento futuro de zonas costeiras e linhas de costa.

#### 4.1. LIMITAÇÕES

- Diversas áreas sujeitas a inundações podem ser completamente alagadas com um aumento do nível do mar. Foram realizados alguns testes neste estudo. No entanto, não se dispunha de topografia nestas regiões e por isso adotaram-se valores constantes. Para resolver estas regiões passíveis de ser alagadas, são necessários dados de batimetria/topografia de detalhe, além de realizar o refinamento da grade nessas regiões;
- Utilizou-se a batimetria atual para simular as condições futuras (de aumento do nível do mar), no entanto não foi considerado que ao longo dos anos, com o aumento gradativo do nível, poderá/deverá haver alteração das cotas batimétricas devido aos processos de transporte que já ocorrem no ambiente, além de alterações nos processos de deposição/erosão que podem ocorrer devido ao aumento do nível;
- Avaliou-se a variação do campo de correntes em função do aumento do nível do mar. No entanto, não foram testados cenários de aumento da temperatura e variação da salinidade da água, e possível variação no padrão de correntes com base na variação de densidade das massas d'água, devido à complexidade da aplicação e difícil interpretação de diversas variáveis em conjunto.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho realizado conduziu às seguintes considerações finais:

- A partir da observação geral dos resultados do modelo hidrodinâmico, para a condição atual do Sistema Estuarino observa-se uma intensificação das correntes nas regiões dos canais de Santos, São Vicente e Bertioga.
- O Canal do Porto de Santos apresenta as velocidades mais intensas do domínio estudado.
- A análise dos dados medidos pelo LDC (dados pontuais) indica que as correntes alcançam velocidades superiores durante a maré vazante, para os três pontos coletados: no Canal principal do Porto de Santos, no Canal de São Vicente e no Canal de Bertioga.
- O modelo numérico hidrodinâmico implementado representou de forma satisfatória a hidrodinâmica da área de estudo. Isso foi comprovado através da comparação de seus resultados com dados de elevação e correntes coletados em campo.
- As variações do nível do mar, resultantes de efeitos meteorológicos extremos, foram representadas pelo modelo hidrodinâmico ao implementarmos uma forçante denominada Riemann, composta de maré astronômica e resultados de elevação e correntes do modelo HYCOM. Ao considerarmos apenas a maré astronômica como forçante, o modelo não consegue reproduzir estas oscilações no nível médio.
- Com o aumento do nível do mar ocorre alteração na velocidade das correntes, mais evidente durante a sizígia. As máximas continuam a ocorrer durante a maré vazante e no Canal do Porto de Santos.

- Com o aumento do nível do mar observa-se um aumento da magnitude da corrente em praticamente todo o Canal de São Vicente e redução da velocidade nos canais do Porto de Santos, Bertioga e na região interna do Estuário de Santos.
- Outras forçantes que podem alterar a circulação da região com o aumento do nível do mar não foram consideradas (variação da salinidade, variação das vazões dos rios, padrões de circulação atmosféricos, ondas incidentes, aumento de eventos extremos e consequentes alterações batimétricas) no presente estudo.
- Este estudo deve ser aprimorado, com aprofundamento em outras áreas e/ou em conjunto com novas variáveis e forçantes, possibilitando melhor gerenciamento futuro de zonas costeiras e linhas de costa.

## 6. BIBLIOGRAFIA

ALFREDINI, P. & ARASAKI, E. 2009. Obras e Gestão de Portos e Costas: a técnica aliada ao enfoque logístico e ambiental. 2ª ed. São Paulo: Edgard Blucher.

ALFREDINI, P.; ARASAKI, E. & AMARAL, R.F.A. 2007. Mean sea-level rise impacts on Santos Bay, Southeastern Brazil - physical modelling study. Environ Monit Assess. DOT 10.007/s10661-007-0001-z.

AFONSO, C. M. A. 2006 paisagem da Baixada Santista: urbanização, transformação e conservação. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo: FAPESP. 312 p.

BLUMBERG, A.F. & MELLOR, G.L., 1985. Modelling vertical and horizontal diffusivities with the sigma coordinate system. Mon Weather Rev, v.113, n.8.

Chini, N.; Stansby, P.; Leake, J.; Wolf, J.; Roberts-Jones J. & Lowe, J. 2010. The impact of sea level rise and climate change on inshore wave climate: A case study for East Anglia (UK). Coast Eng. v.57. p.973-984.

Church, J.A., P.U. Clark, A. Cazenave, J.M. Gregory, S. Jevrejeva, A. Levermann, M.A. Merrifield, G.A. Milne, R.S. Nerem, P.D. Nunn, A.J. Payne, W.T. Pfeffer, D. Stammer and A.S. Unnikrishnan, 2013: Sea Level Change. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

CODESP, 2008. EIA-RIMA da Dragagem de Aprofundamento do Canal de Acesso e Bacias de Evolução do Porto Organizado de Santos.

COELHO, T. M. Análise do transporte de sedimentos na região central da Baixada Santista (SP) através de modelagem numérica. Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Ciências, na área de Oceanografia Física. Universidade de São Paulo. São Paulo.

COMISSÃO NACIONAL INDEPENDENTE SOBRE OS OCEANOS, 1998. O Brasil e o Mar no Século XXI: Relatório aos Tomadores de Decisão do País. Rio de Janeiro.

DELTARES. 2012. Delft3D-QUICKPLOT. Visualisation and animation program for analysis of simulation results. User Manual. Disponível em: [http://oss.deltares.nl/documents/183920/185723/Delft3D-QUICKPLOT\\_User\\_Manual.pdf](http://oss.deltares.nl/documents/183920/185723/Delft3D-QUICKPLOT_User_Manual.pdf). Acesso em 28/abr/2013.

DEFANT, A. 1960. Physical Oceanography, Vol.2 Pergamon Press, New York, 598 pp.

DELTARES, 2013. User Manual Delft3D-FLOW. Simulation of Multi-Dimensional Hydrodynamic and Transport Phenomena, Including Sediments. Deltares, Delft, The Netherlands. 702pp.

ECKART, C., 1958. Properties of water, Part II. The equation of state of water and sea water at low temperatures and pressures. Am J Sci, vol.256, p.225-240.

EPA (Environmental Protection Agency). 2000. Hydrodynamic and Water Quality Model of Christina River Basin. Region III, Philadelphia, PA. Final Report.

FEMAR, 2013. FUNDAÇÃO DE ESTUDOS DO MAR: ESTAÇÕES MAREGRÁFICAS. DISPONÍVEL EM: <HTTP://WWW.FUNDACAOFEMAR.ORG.BR/#>. ACESSO EM: 09/OUT/2013.

FUNDESPA. 1999. Levantamento Oceanográfico da Área Diretamente Afetada por Efluentes dos Emissários Submarinos de Esgotos da SABESP, Entre os

Municípios de São Sebastião e Mongaguá, Estado de São Paulo. Relatório Técnico.

HARARI, J. & CAMARGO, R., 1995. Tides and mean sea level variability in Santos (SP), 1944 to 1989. Relatório Interno do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, n.36, p.1-15.

HARARI, J.; CAMARGO, R. 1998. Modelagem numérica da região costeira de Santos (SP): circulação de maré. Revista Brasileira de Oceanografia, v.46(2), p.135-156.

HARARI, J; CAMARGO, R. ; CACCIARI, P. L. 1999. Implantação de um sistema de previsão de marés e correntes de maré na Baixada Santista através de modelo numérico tridimensional. Relatórios Técnicos do Instituto Oceanográfico, São Paulo, v.45, p.1-21.

HARARI, J. & GORDON, M. 2001. Simulações Numéricas da Dispersão de Substâncias no Porto e Baía de Santos, sob a Ação de Marés e Ventos. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. vol.6. n.4. p.115-131.

HARARI, J.; CAMARGO, R.; MIRANDA, L. B. 2002. Modelagem numérica hidrodinâmica tridimensional da região costeira e estuarina de São Vicente e Santos (SP). Pesquisa Naval (SDM), Rio de Janeiro, v. 15, p. 79-98.

HARARI, J., FRANÇA, C. A. S; CAMARGO, R. 2008. Variabilidade de longo termo de componentes de maré e do nível médio do mar na costa brasileira. Disponível em: [http://www.mares.io.usp.br/aagn/aagn11/ressimgf\\_versao2008.pdf](http://www.mares.io.usp.br/aagn/aagn11/ressimgf_versao2008.pdf). Acesso em 30/11/2015.

HARARI, J. 2015. Fundamentos de Modelagem Numérica em Oceanografia. São Paulo. Editora Salt | Sea and Limno Technology.

HESS, K.W. & BOSLEY, K.T. 1992. Methodology for Validation of a Tampa Bay Circulation Model. Proceedings, 2nd International Conference on Estuarine and Coastal Modeling, Tampa, Florida, November 11-13, 1991. p.83-94.

IPCC. 2007. Intergovernmental Panel on Climate Change: Climate Change 2007: Synthesis Report. Disponível em: [http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/syr/en/spms1.html](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/en/spms1.html). Acesso em 28/abr/2013.

JOCHEN, H.; JAEGER, C.; NICHOLLS, R. J.; LOWE, J.; RENN, O. & PEIJUN, S. 2015. Sea-level rise scenarios and coastal risk management. Nature Climate Change. vol. 5.

MIRANDA, L.B.; CASTRO, B.M. & KJERFVE, B. 2002. Princípios de Oceanografia Física de Estuários. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo.

MITCHELL, S. B; JENNERJAHN, T. C.; VIZZINI, S. & ZHANG, W. 2015. Changes to processes in estuaries and coastal waters due to intense multiple pressures – An introduction and synthesis, Est Coast Shelf Sci, vol.156. p.1-6.

Nicholls, R.J., P.P. Wong, V.R. Burkett, J.O. Codignotto, J.E. Hay, R.F. McLean, S. Ragoonaden and C.D. Woodroffe, 2007. Coastal systems and low-lying areas. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, p.315-356.

PHILLIPS, N.A., 1957. A co-ordinate system having some special advantages for numerical forecasting, J of Meteorology, vol.14.

PRANDLE, D. & LANE, A. 2015. Sensitivity of estuaries to a sea level rise: Vulnerability indices. Est Coast Shelf Sci. vol.160. p.60-68.

PRITCHARD, D.W. 1952. Estuarine Hydrography. Advances in Geophysics. New York, Academic Press, vol.1.

RODI, W. 1984. Turbulence models and their application in Hydraulics, State-of-the-art paper article sur l'etat de connaissance. IAHR paper presented by the IAHR-Section on Fundamentals of Division II: Experimental and Mathematical Fluid Dynamics, The Netherlands.

ROSS, A. C.; NAJJAR, R. G.; LI, M.; MANN, M. E.; FORD, S. E. & KATZ, B. 2015. Sea-level rise and other influences on decadal-scale salinity variability in a coastal plain estuary. Est Coast Shelf Sci. vol.157. p.79-92.

ROVERSI, F. Estudo Hidrodinâmico e de Renovação das Águas do Sistema Estuarino de Santos. Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Oceânica. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.

SAMPAIO, A.F.P. 2010. Avaliação da correlação entre parâmetros da qualidade de água e socioeconômicos no complexo estuarino de Santos – São Vicente, através da modelagem numérica ambiental. Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Ciência Ambiental. Universidade de São Paulo. São Paulo.

SCHUREMANN, P. 1941. Manual of harmonic analysis and prediction of tides. Washington, D.C., U.S. Coast & Geodetic Surv., S.P. n.98, 317 p.

SPIEGEL, M.R. & STEPHENS, L. J. 1999. Theory and Problems of Statistics. McGraw-Hill – New York. 538 p.

STELLING, G.S. & VAN KESTER, J.A.TH.M., 1994. On the approximation of horizontal gradients in sigma coordinates for bathymetry with steep bottom slopes, Int. J. Num. Meth. Fluids, vol.18, p.915-955.

SWEERS, H.E. 1976. A nomogram to estimate the heat exchange coefficient at the air-water interface as a function of wind speed and temperature; a critical survey of some literature. *J Hydrol*, vol.30:4, p.375-401.

WALSTRA. L.C., VAN RIJN. L.C., BLOGG, H. & VAN ORMONDT. M. 2001. Evaluation of a hydrodynamic area model based on the COAST3D data at Teignmouth 1999. Report TR121 - EC MAST Project No. MAS3- 0197-0086. HR Wallingford, UK.

WILLMOTT C.J. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. *American Meteorological Society Bulletin*, 1309-1313.

YANG, Z.; WANG, T.; VOISIN, N & COPPING, A. 2015. Estuarine response to river flow and sea-level rise under future climate change and human development. *Est Coast Shelf Sci.* vol.156. p.19-30.