SILENE CRISTINA BAPTISTELLI

ANÁLISE CRÍTICA DA UTILIZAÇÃO DE MODELAGEM MATEMÁTICA NA AVALIAÇÃO DA DISPERSÃO DE EFLUENTES LEVES NO LITORAL DA BAIXADA SANTISTA (ESTADO DE SÃO PAULO)

São Paulo
2008

SILENE CRISTINA BAPTISTELLI

ANÁLISE CRÍTICA DA UTILIZAÇÃO DE MODELAGEM MATEMÁTICA NA AVALIAÇÃO DA DISPERSÃO DE EFLUENTES LEVES NO LITORAL DA BAIXADA SANTISTA (ESTADO DE SÃO PAULO)

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Doutor em Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia Hidráulica

Orientador:
Professor Doutor Paolo Alfredini

São Paulo

2008

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, ... de outubro de 2008.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Baptistelli, Silene Cristina
Análise crítica da utilização de modelagem matemática na avaliação da dispersão de efluentes leves no litoral da Baixada Santista (Estado de São Paulo) / S.C. Baptistelli. -- ed.rev. -- São Paulo, 2008.
314 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária.

1.Modelagem matemática 2.Hidráulica marítima 3.Correntes marinhas 4.Efluentes (Dispersão) I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária II.t.

Dedicatória

À MINHA AMADA FILHA ANA JÚLIA, MEU ORGULHO E MINHA ALEGRIA.

AO MEU PAI LINO, MEU EXEMPLO DE VIDA E MINHA MÃE VITÓRIA (IN MEMORIAM), SEMPRE PRESENTE NA MINHA VIDA.

Agradecimentos

Em especial, ao meu orientador Professor Dr. PAOLO ALFREDINI pela preciosa orientação, pelo incansável apoio e incentivo durante a elaboração desta Tese, e principalmente, por todo o conhecimento transmitido, com os quais eu pude me encantar pela área da Hidráulica Marítima. Agradeço pelo apoio dado ao meu projeto de ir à Holanda buscar novos conhecimentos.

Ao PROFESSOR DR. JOSEPH HARARI pela valiosa contribuição em fornecer dados que foram discutidos e analisados nesta Tese. Agradeço pelas frutíferas discussões que muito contribuíram na elaboração deste trabalho.

Ao UNESCO - Institute for Water Education, na pessoa do Professor DR. DANO ROELVINK por proporcionar a utilização do programa computacional Delft3D. Com especial agradecimento aos Professores Dr. DANO ROELVINK e Dr. MICK VAN DER WEGEN do Departamento de Portos e Engenharia Costeira do UNESCO-IHE, pela orientação e auxilio no uso do modelo.

Aos examinadores do Exame de Qualificação desta Tese: Professor Dr. PAOLO ALFREDINI, Dr. EDUARDO YASSUDA e Dr. ROGÉRIO FERNANDO DO AMARAL pelas valiosas sugestões.

Ao Dr. EDUARDO YASSUDA pelas valiosas discussões, tanto na banca da qualificação, quanto nos encontros na SABESP e no seu escritório, e também por permitir que profissionais de sua equipe de trabalho, José Edson, Marco Antonio e Tiago (ASA - Applied Science Associates South America) me auxiliassem na preparação dos dados de entrada nos modelos.

Aos engenheiros EDSON J. ANDRIGUETI, ANTÔNIO AUGUSTO DA FONSECA, ELÍSIO JACQUES A. CASTRO, MARIA REGINA F. CAMPOS, NILTON FURUKAWA, VERA MARIA B. LEITE, GLADYS F. JANUÁRIO, FABIANA R. L. PRADO, EDWARD BRAMBILLA MARCELINO, CÉLIA C. FRANCO, PAULA VILLELA, LUIS CARLOS HELOU e aos demais amigos sabespianos que apoiaram e contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

À COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO – SABESP, e ao LABORATÓRIO DE HIDRÁULICA DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E SANITÁRIA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA USP, pelo apoio e facilidades concedidas para que esta Tese fosse realizada.

Aos colegas do LABORATÓRIO DE HIDRÁULICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE SÃO PAULO pela ajuda e apoio na elaboração deste trabalho.

Ao Dr. RODRIGO NOGUEIRA DE ARAÚJO pela ajuda e incentivo.

Ao meu pai LINO BAPTISTELLI, à minha tia IVANILDE BAPTISTELLI, à minha avó ANNA JÚLIA S. BAPTISTELLI e à minha filha ANA JÚLIA BAPTISTELLI AQUINO, pelo apoio e estímulo que sempre me dispensaram, principalmente pela compreensão quanto aos momentos que foram subtraídos de nossa convivência diária para que eu pudesse concluir este trabalho. Todo o meu amor à minha família querida.

Às minhas queridas amigas TANIA BASSO E VERA MARIA BARBOSA LEITE pelo incansável apoio e estímulo, pela paciência e principalmente pela grande amizade.

Ao amado ALDEMAR PRUDENTE DE TOLEDO FILHO, pelo seu apoio, incentivo e carinho nos momentos mais difíceis.

Os meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta Tese.

Por último, no entanto o mais importante agradecimento, a DEUS.

“The sea is everything. It covers seven tenths of the terrestrial globe. Its breath is pure and healthy. It is an immense desert, where man is never lonely, for he feels life stirring on all sides.”

(Julio Verne)

“The sea, once it casts its spell, holds one in its net of wonder forever.”

(Jacques Yves Cousteau)

RESUMO

Prever a hidrodinâmica das águas e a dispersão de contaminantes nos corpos d'água, principalmente em regiões costeiras, tem sido um problema a ser enfrentado por engenheiros, devido ao aumento dos impactos ambientais que envolvem as obras e a gestão da engenharia costeira. O uso de modelagem matemática como ferramenta de avaliação tornou-se imperativo para tais estudos. O principal objetivo desta Tese é fazer uma análise crítica da utilização da ferramenta de modelagem matemática na avaliação da dispersão de efluentes leves. A área de estudo engloba a RMBS, com ênfase no Sistema Estuarino de Santos / São Vicente. Para a efetivação desta análise são utilizados três modelos hidrodinâmicos - MIKE 21, POM e Delft3D. Esta abordagem apresentou significativa contribuição para as principais conclusões desta Tese e demonstrou, na prática, as diferenças na utilização dos modelos numéricos hidrodinâmicos. Os resultados dos três modelos utilizados apresentaram-se satisfatórios, sendo que os coeficientes de correlação encontrados, entre os resultados das simulações e dados de medição de campo, para o período de Verão de 2002 foram para o MIKE 21 de 0,63 (considerado 20 dias de processamento); o Delft3D de 0,80 (20 dias) e o POM de 0,70 (30 dias), para a Componente x (Componente E-W do vetor velocidade). Os resultados da modelagem com o POM e o Delft3D, comparados com os dados de medição de campo, imprimiram confiabilidade aos dados de correntes extraídos para o Ponto de Lançamento do Emissário de Santos/São Vicente. Neste ponto a máxima velocidade encontrada, na média da profundidade, foi de 0,27 m/s e, somente na superfície esta velocidade pode chegar a 0,35 m/s. Para a avaliação da dispersão da pluma deste emissário, foi utilizado o sistema especialista CORMIX e seus resultados mostraram que para velocidades de 0,27 e 0,18 m/s as diluições iniciais são superiores a 100 e que nas velocidades 0,08 e 0,12 m/s a diluição inicial é menor que 100. Julga-se que este trabalho contribuiu para a obtenção de um grau maior de conhecimento sobre as questões práticas da modelagem hidrodinâmica. Ou seja, esta contribuição é um passo fundamental para que o assunto seja visto de uma forma mais realista, mostrando e discutindo as características e limitações teóricas e práticas existentes em cada modelo utilizado, sob a ótica da engenharia.

Palavras-chave: Modelagem matemática. Hidráulica marítima. Circulação de correntes. Efluentes [dispersão].

ABSTRACT

The prediction of the hydrodynamic water circulation and pollutants dispersion, mainly in coastal areas, has been a problem that engineers have been facing. This is due to the increase environmental impacts that involve coastal engineering work and management. The usage of mathematic modeling as assessment tool is necessary for these studies. The main purpose of this Thesis consists in using hydrodynamics models in order to evaluate the hydrodynamical behavior in the region, and to study the effluents dispersion by approaching the marine's pollution issue mainly concerning domestic wastewater, and petroleum byproducts leakage. The study area is located in the Central Coast of São Paulo State, named Baixada Santista. The highlighted area analyzed is Santos / São Vicente Estuarine System. Three hydrodynamics models were used - MIKE 21, POM and Delft3D. This approach presented a significant contribution for the main conclusions of this Thesis, and it shows the differences among the hydrodynamics mathematical models. The three models presented good results, the correlation coefficients that were found for the Summer of 2002 were 0.63 for MIKE 21 (considering 20 days of processing); 0.80 for Delft3D (20 days); and 0.70 for POM (30 days), for Component x (Component E-W of velocity vector). In the Point of Santos / São Vicente Outfall Discharge, the maximum depth average velocity reaches 0.27 m/s, and in first layer (surface) the velocity can reach 0.35 m/s. In the assessment of plume dispersion for this outfall, was used the software CORMIX and the results has shown initial dilution higher than 100 for the velocities of 0.27 and 0.18 m/s; and initial dilution lower than 100 for the velocities of 0.08 and 0.12 m/s. This Thesis contributed to obtain a better knowledge about hydrodynamic mathematic modeling. The research reveals a realistic point of view of the characteristics and limitations, in theoretical and practical terms, existing in each model used, from engineering perspective.

Keywords: Mathematical modeling. Maritime hydraulics. Currents circulation. Effluents [dispersion].

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização geográfica da área de estudo – Litoral da Baixada Santista 15

Figura 2 – Foto aérea da Baía de Santos mostrando a Cidade e o Porto de Santos. Na indicação (com seta) está a visualização do contorno da pluma do efluente lançado pelo emissário de Santos / São Vicente. (Fonte: BLENINGER, 2006) .15

Figura 3 – Aspectos gerais sobre a área de estudo – Baixada Santista 15

Figura 4 – Aspectos gerais sobre a área de estudo – Sistema Estuarino de Santos e São Vicente.....15

Figura 5 – Localização dos Pontos de Medição referentes aos trabalhos de coleta de dados da região de estudo.....15

Figura 6 – Circulação da Baía de Santos nas fases enchente e vazante na superfície, meia profundidade e fundo. Fonte: Sondotécnica (1977).....15

Figura 7 – Figura esquemática dos contornos das grades batimétricas utilizadas em trabalhos anteriores 15

Figura 8 – Exemplo de σ-grid (à esquerda) e Z-grid (à direta) 15

Figura 9 – Esquemático de um modelo hidrodinâmico de área costeira com três bordas abertas 15

Figura 10 – Estruturação da Tese.....15

Figura 11 – Figura Esquemática - Área definidas para modelagem – Meso-escala, Baixada Santista e Estuário e Baía de Santos.....15

Figura 12 – Batimetria de Meso-escala gerada pelo MIKE 21 – Espaçamento horizontal de 2.000m, grade de 86 por 301 pontos.....15

Figura 13 – Batimetria da Baixada Santista gerada pelo MIKE 21 – Espaçamento horizontal de 300m, grade de 161 por 501 pontos.....15

Figura 14 – Batimetria do Estuário e Baía de Santos gerada pelo MIKE 21 HD – Espaçamento horizontal de 90 m, grade de 521 por 411 pontos.....15

Figura 15 – Batimetria da região da Baixada Santista gerada pelo POM – espaçamento horizontal de 1.000 m – Grade de 120 x 80 pontos.....15

Figura 16 – Figura elaborada a partir de arquivo ASCII da batimetria do Estuário e Baia de Santos – Arquivo “Sample” gerado pelo Delft3D-RGFGRID.....15

Figura 17 – Grade do Estuário e Baia de Santos gerada a partir do módulo Delft3D-QUICKIN 15

Figura 18 – Batimetria gerada pelo Delft3D – Espaçamento horizontal 300 m, grade de 102 x 112 pontos.....15

Figura 19 – Localização dos pontos de medição de campo e dos pontos de lançamento dos emissários submarinos de Santos / São Vicente e Praia Grande 15

Figura 20 – Esquemático das Folhas de Bordo e Cartas Náuticas digitalizadas.....15

Figura 21 – Dados de medição de vento na praia da Enseada no Guarujá – Anemógrafo Ilha das Cabras – Campanha de Verão – 07/02/2002 a 03/04/2002 15
Figura 22 – Dados de medição de vento na praia da Enseada no Guarujá – Anemógrafo Ilha das Cabras - Campanha de Inverno – 19/07/2002 a 27/09/2002 15
Figura 23 – Rosa dos ventos – Dados de ventos medidos na praia da Enseada do Guarujá – Anemógrafo da Ilha das Cabras - Verão 2002 15
Figura 24 - Rosa dos ventos – Dados de ventos medidos na praia Enseada do Guarujá – Anemógrafo da Ilha das Cabras - Inverno 2002 15
Figura 25 - Dados de medição de vento na Praia Grande – Anemógrafo Praia Grande - 22/07/2005 a 17/11/2005 15
Figura 26 - Rosa dos ventos – Dados de ventos medidos na Praia Grande – Anemógrafo Praia Grande – Período de 22/07/2005 a 17/11/2005 15
Figura 27 – Espectro de amplitudes das componentes dos vetores de vento medidos na Praia Grande – Período de 22/07/2005 a 22/12/2005. Fonte: SABESP (2006) 15
Figura 28 – Comparação entre os dados de vento medidos na praia da Enseada e os dados de vento do NCEP – Verão 2002 15
Figura 29 – Comparação entre os dados de vento medidos na praia da Enseada e os dados de vento do NCEP – Inverno 2002 15
Figura 30 – Comparação entre os dados de vento medidos na Praia Grande e os dados de vento do NCEP – Inverno 2005 15
Figura 31 – Representação da distribuição espacial do vento e da pressão na área de estudo – Dados NCEP 15
Figura 32 – Dados registrados pelo Marégrafo na Ilha das Palmas na Campanha de Verão – 09/02/2002 a 27/03/2002 15
Figura 33 – Dados registrados pelo Marégrafo na Ilha das Palmas na Campanha de Inverno - 18/07/2002 a 13/09/2002 15
Figura 34 - Dados registrados pelo Marégrafo na Ilha das Palmas na Campanha de Inverno – 01/07/2005 a 31/08/2005 15
Figura 35 – Dados de medição de correntes em três profundidades (1m, 8m, 17m) – Verão – Ponto ADCP-CODESP – Fonte: CODESP (2002) 15
Figura 36 – Dados de medição de correntes em três profundidades (1m, 8m, 17m) – Inverno – Ponto ADCP-CODESP – Fonte: CODESP (2002) 15
Figura 37 – Rosa das Correntes – Dados de correntes medidos – Verão 2002 – Ponto ADCP-CODESP – Média da Profundidade 15
Figura 38 - Rosa das Correntes – Dados de correntes medidos - Inverno 2002 – Ponto ADCP-CODESP – Média na Profundidade 15
Figura 39 – Dados de medição de correntes em três profundidades (1m, 5m e 10m) – Ponto ADCP-SABESP – Fonte: SABESP (2006) 15

Figura 40 - Rosa das Correntes – Dados de correntes medidos – Inverno 2005 – Ponto ADCP-SABESP – Média na Profundidade 15

Figura 41 – Gráficos dos Dados de medição de corrente no ponto de lançamento do emissário submarino de Santos / São Vicente. Fonte: SABESP (2006).....15

Figura 42 - Distribuição da salinidade no fundo da Baía de Santos - Verão de 1998 15

Figura 43 – Distribuição da salinidade e temperatura (superfície e fundo) – Campanha de Julho de 2005 – Inverno – Fonte: SABESP, 2006.....15

Figura 44 - Comparação entre resultados da simulação com o MIKE 21 (Grade Meso-escala) – Simulação com Maré e Simulação com Maré + Elevação POM - Verão 2002 – Ponto ADCP-CODESP 15

Figura 45 - Comparação entre resultados da simulações com o MIKE 21 (Grade Santos) – Simulações com Vento NCEP e Simulações com Vento NCEP + Vento Local – Inverno 2005 – Ponto ADCP-SABESP.....15

Figura 46 – Comparação de valores de elevação da superfície entre a Simulação MIKE 21 e Observações de Campo.....15

Figura 47 – Gráficos de dispersão entre os valores de elevação da superfície entre a Simulação MIKE 21 e Observações de Campo 15

Figura 48 - Comparação entre dados de correntes medidos em campo e resultados da simulação com o MIKE 21 (Grade Meso-escala) – Ponto ADCP-CODESP – Verão 2002 – Velocidades Médias.....15

Figura 49 - Comparação entre dados de correntes medidos em campo e resultados da simulação com o MIKE 21 (Grade Meso-escala) – Ponto ADCP-CODESP – Inverno 2002 – Velocidades Médias 15

Figura 50 - Comparação entre dados de correntes medidos em campo e resultados da simulação com o MIKE 21 (Grade Meso-escala) – Ponto ADCP-CODESP – Inverno 2005 – Velocidades Médias 15

Figura 51 - Resultado da simulação do Verão de 2002 - MIKE 21 – Mapas de correntes – Grade Meso-escala - (10/02/02 – 7:30 h e 8:00 h – Sizígia – Vazante).....15

Figura 52 - Resultado da simulação do Verão de 2002 - MIKE 21 – Mapas de correntes – Grade Meso-escala - (20/02/02 – 20:30 h e 21:00 h – Quadratura – Enchente).....15

Figura 53 - Resultado da simulação do Verão de 2002 - MIKE 21 – Mapas de correntes – Grade Meso-escala - (23/02/02 – 16:00 h e 16:30 h – Sizígia – Vazante).....15

Figura 54 - Resultado da simulação do Inverno de 2005 - MIKE 21 – Mapas de correntes – Grade Meso-escala - (26/07/05 – 00:30 h e 2:30 h – Sizígia – Vazante).....15

Figura 55 - Resultado da simulação do Inverno de 2005 - MIKE 21 – Mapas de correntes – Grade Meso-escala - (1/8/05 – 17:30 h e 19:00 h – Quadratura – Enchente).....15

Figura 56 - Comparação entre dados de correntes medidos em campo e resultados da simulação com o MIKE 21 (Grade Baixada)- Ponto ADCP-CODESP – Verão 2002 – Velocidades Médias 15

Figura 57 - Comparação entre dados de correntes medidos em campo e resultados da simulação com o MIKE 21 (Grade Baixada) – Ponto ADCP-CODESP – Inverno 2002 – Velocidades Médias 15

Figura 58 - Resultado da simulação do Verão de 2002 - MIKE 21 – Mapas de correntes – Grade Baixada – (a) 19/02/02 – 9:15 h – Quadratura – Vazante (b) 22/02/2002 – 7:45 h - Quadratura – Enchente 15

Figura 59 - Resultado da simulação do Verão de 2002 - MIKE 21 – Mapas de correntes – Grade Baixada – (a) 25/02/02 – 13:45 h – Sizígia – Estofa de maré (b) 25/02/2002 – 15:45 – Sizígia – Vazante 15

Figura 60 - Resultado da simulação do Verão de 2002 - MIKE 21 – Mapas de correntes – Grade Baixada – (a) 27/02/02 – 23:45 h – Sizígia – Enchente (b) 28/02/2002 – 02:15 – Sizígia – Enchente 15

Figura 61 – Gráfico de Elevação da Superfície mostrando os instantes em que foram apresentados os mapas de correntes – Verão 2002 15

Figura 62 - Trajetórias traçadas a partir (a) do Ponto de Lançamento dos Emissários Submarinos de Santos / São Vicente e do ponto próximo a Ponta de Itaipu; (b) do Ponto de Lançamento do Emissário Submarino de Praia Grande – PG1 e do ponto próximo à praia - Resultados de simulações com MIKE 21 – Grade Baixada - Período de 16/02/2002 a 3/03/2002 15

Figura 63 - Comparação entre dados de correntes medidos em campo e resultados da simulação com o MIKE 21 (Grade Santos) – Ponto ADCP-CODESP – Verão 2002 – Velocidades Médias 15

Figura 64 - Comparação entre dados de correntes medidos em campo e resultados da simulação com o MIKE 21 (Grade Santos) – Ponto ADCP-CODESP – Inverno 2002 – Velocidades Médias 15

Figura 65 - Comparação entre dados de correntes medidos em campo e resultados da simulação com o MIKE 21 (Grade Santos) – Ponto ADCP-SABESP – Inverno 2005 – Velocidades Médias 15

Figura 66 - Resultado da simulação do Verão de 2002 – MIKE 21– Mapas de correntes – Grade Santos - Figura (a): 22/02/2002 – 4:00 h – Vazante – Figura (b): 22/02/2002 – 9:00 h – Enchente - Quadratura 15

Figura 67 - Resultado da simulação do Verão de 2002 – MIKE 21– Mapas de correntes – Grade Santos - Figura (a): 25/02/2002 – 6:00 h – Vazante – Figura (b): 25/02/2002 – 11:00 h – Enchente - Sizígia 15

Figura 68 - Resultado da simulação do Verão de 2002 – MIKE 21– Mapas de correntes – Grade Santos – Detalhe Canal do Porto 15

Figura 69 - Resultado da simulação do Inverno de 2002 – MIKE 21– Mapas de correntes – Grade Santos - Figura (a): 24/07/02 – 5:00 h – Vazante – Figura (b): 24/07/02 – 12:00 h – Sizígia - Enchente 15

Figura 70 - Resultado da simulação do Inverno de 2002 - MIKE 21– Mapas de correntes – Grade Santos - Figura (a): 28/07/02 – 08:00 h – Vazante – Figura (b): 28/07/02 – 14:00 h – Sizígia – Enchente 15

Figura 71 - Resultado da simulação do Inverno de 2002 - MIKE 21– Mapas de correntes – Grade Santos - Figura (a): 01/08/02 – 03:00 h – Enchente – Figura (b): 01/08/02 – 14:30 h – Quadratura – Vazante 15

Figura 72 – Gráfico de Elevação da Superfície mostrando os instantes em que foram apresentados os mapas de correntes – Inverno 2002 15

Figura 73 – Trajetórias traçadas a partir dos pontos de lançamento dos emissários submarinos de Santos / São Vicente e Praia Grande com os resultados de simulações com MIKE 21. Período de 22/02/2002 a 24/02/2002..... 15

Figura 74 - Trajetórias traçadas a partir dos pontos de lançamento dos emissários submarinos de Santos / São Vicente e Praia Grande com os resultados de simulações com MIKE 21. Período de 25/02/2002 a 27/02/2002..... 15

Figura 75 – Comparação entre dados de correntes medidos em campo e resultados da simulação com o MIKE 21 (Três Grades) – Ponto ADCP-CODESP – Verão 2002 – Velocidades Médias 15

Figura 76 - Gráfico de dispersão entre os valores da 'Componente x' da Velocidade de Corrente entre a Simulação MIKE 21 e Observações de Campo – Verão 2002 – Grades Meso-escala e Baixada 15

Figura 77 - Gráfico de dispersão entre os valores da 'Componente x' da Velocidade de Corrente entre a Simulação MIKE 21 e Observações de Campo – Inverno 2002 e Inverno 2005 – Grades Baixada e Santos..... 15

Figura 78 – Localização de Fundeadouros para navios que atracam no Porto de Santos 15

Figura 79 - Trajetórias traçadas a partir de Pontos de Fundeadouros para embarcações com os resultados de simulações com MIKE 21: (a) Centro da área para fundeadouros de emergência (b) Centro da área de fundeadouros para navios com programação definida de atracação (c) Centro da área de fundeadouros com programação (dia e hora não definidas) (d) Centro da área de fundeadouros sem programação – Período de 16/02/2002 a 3/03/2002 15

Figura 80 - Trajetórias traçadas a partir de Pontos de Fundeadouros para embarcações com os resultados de simulações com MIKE 21: (a) Centro da área para fundeadouros de emergência (b) Centro da área de fundeadouros para navios com programação definida de atracação (c) Centro da área de fundeadouros com programação (dia e hora não definidas) (d) Centro da área de fundeadouros sem programação – Período de 27/07/2002 a 6/08/2002 15

Figura 81 - Trajetórias traçadas a partir de Pontos de Fundeadouros: interno; destinado a navios de guerra e destinados a navios para inspeção sanitária - Simulações MIKE 21: (a) Período de 23/07 a 02/08/2005, início em Enchente de Sizígia (b) Período de 24/07 a 29/07/2005, início em Vazante de Sizígia (c) Período de 28/07a 02/08/2005, início em Enchente de Quadratura 15

Figura 82 – Velocidades e direção das correntes no ponto de lançamento do emissário submarino de Santos / São Vicente – Verão 2002 – Simulação MIKE 21 15

Figura 83 – Velocidades e direção das correntes no ponto de lançamento do emissário submarino de Santos / São Vicente – Inverno 2002 – Simulação MIKE 21 15

Figura 84 – Velocidades e direção das correntes no ponto de lançamento do emissário submarino de Santos / São Vicente – Inverno 2005 – Simulação MIKE 21 15

Figura 85 - Comparação de valores de elevação da superfície entre a Simulação POM e Observações de Campo 15

Figura 86 - Gráficos de dispersão entre os valores de elevação da superfície entre a Simulação POM e Observações de Campo 15

Figura 87 - Comparação entre dados de correntes medidos em campo e resultados da simulação com o POM – Verão 2002 – Velocidades Médias na Profundidade – Ponto ADCP-CODESP 15

Figura 88 – Comparação entre dados de correntes medidos em campo e resultados da simulação com o POM – Inverno 2002 – Velocidade Média na Profundidade – Ponto ADCP-CODESP 15

Figura 89 – Comparação entre dados de correntes medidos em campo e resultados da simulação com o POM – Inverno 2002 – Velocidades na Superfície (1 m de profundidade) – Ponto ADCP-CODESP 15

Figura 90 - Comparação entre dados de correntes medidos em campo e resultados da simulação com o POM – Inverno 2002 – Velocidades na Profundidade ½ água (8 m de profundidade) – Ponto ADCP-CODESP 15

Figura 91 - Comparação entre dados de correntes medidos em campo e resultados da simulação com o POM – Inverno 2002 – Velocidades no Fundo (16 m de profundidade) – Ponto ADCP-CODESP 15

Figura 92 - Comparação entre dados de correntes medidos Velocidade Média na Profundidade – Ponto ADCP-SABESP 15

Figura 93 – Resultado da simulação do Verão de 2002 - Mapa de correntes – POM – 24/02/2002 – 18:00 h – Sizígia – Vazante 15

Figura 94 – Resultado da simulação do Verão de 2002 - Mapa de correntes – POM – 27/02/2002 – 7:00 h – Sizígia – Enchente 15

Figura 95 – Resultado da simulação do Inverno de 2002 - Mapa de correntes – POM – 02/08/2002 – 1:00 h – Quadratura – Vazante 15

Figura 96 - Gráfico de dispersão entre os valores da 'Componente x' da Velocidade de Corrente entre a Simulação POM e Observações de Campo – Verão 2002 – Ponto ADCP-CODESP 15

Figura 97 - Gráfico de dispersão entre os valores da 'Componente x' da Velocidade de Corrente entre a Simulação POM e Observações de Campo – Inverno 2002 – Ponto ADCP-CODESP 15

Figura 98 - Gráficos de dispersão entre os valores da 'Componente x' da Velocidade de Corrente entre a Simulação POM e Observações de Campo – Inverno 2002 – Superfície, Meia Água e Fundo – Ponto ADCP-CODESP 15

Figura 99 - Velocidades e direção das correntes no Ponto de Lançamento do Emissário Submarino de Santos / São Vicente – Profundidade: Superfície, ½ água e Fundo – Verão 2002 – Simulação POM 15

Figura 100 – Velocidades e direção das correntes no Ponto de Lançamento do Emissário Submarino de Santos / São Vicente – Média da Profundidade - Verão 2002 – Simulação POM 15

Figura 101 - Velocidades e direção das correntes no Ponto de Lançamento do Emissário Submarino de Santos / São Vicente – Profundidade: Superfície, ½ água e Fundo – Inverno 2002 – Simulação POM 15

Figura 102 - Velocidades e direção das correntes no Ponto de Lançamento do Emissário Submarino de Santos / São Vicente – Média da Profundidade - Inverno 2002 – Simulação POM 15

Figura 103 - Velocidades e direção das correntes no Ponto de Lançamento do Emissário Submarino de Santos / São Vicente – Profundidade: Superfície, ½ água e Fundo - Inverno 2005 – Simulação POM 15

Figura 104 - Velocidades e direção das correntes no Ponto de Lançamento do Emissário Submarino de Santos / São Vicente – Média da Profundidade – Inverno 2005 – Simulação POM 15

Figura 105 – Gráfico de calibração do modelo Delft3D 15

Figura 106 - Gráfico de dispersão entre os valores da Velocidade de Corrente entre a Simulação Delft3D e Observações de Campo – Inverno 2005 - Calibração ... 15

Figura 107 – Comparação de valores de elevação da superfície entre a Simulação com o Delft3D e os valores de Observações de Campo 15

Figura 108 - Gráficos de dispersão entre os valores de elevação da superfície entre a Simulação Delft3D e Observações de Campo 15

Figura 109 - Comparação entre dados de correntes medidos em campo e resultados da simulação com o Delft3D – Ponto ADCP-CODESP – Verão 2002 – Velocidades na Profundidade Média 15

Figura 110 - Comparação entre dados de correntes medidos em campo e resultados da simulação com o Delft3D – Ponto ADCP-CODESP – Inverno 2002 – Velocidades na Profundidade Média 15

Figura 111 - Comparação entre dados de correntes medidos em campo e resultados da simulação com o Delft3D – Inverno 2005 – Velocidades na Profundidade Média 15

Figura 112 - Resultado da simulação do Verão de 2002 – Mapas de correntes Delft3D – (27/07/02 – 20:00 h – Sizígia – Vazante) – (a) Superfície, (b) ½ Água e (c) Fundo 15

Figura 113 - Resultado da simulação do Verão de 2002 – Mapas de correntes Delft3D – (06/03/02 – 20:00 h – Quadratura – Enchente) – Superfície, ½ Água e Fundo 15

Figura 114 - Resultado da simulação do Inverno de 2002 – (a) Mapa de correntes Delft3D – (31/07/02 – 10:30 h – Quadratura – Vazante) – (b) Perfil da velocidade no Ponto ADCP-CODESP 15

Figura 115 - Resultado da simulação do Inverno de 2002 – (a) Mapa de correntes Delft3D – (02/08/02 – 19:30 h – Quadratura – Enchente) – (b) Perfil da velocidade no Ponto ADCP-CODESP 15

Figura 116 - Resultado da simulação do Inverno de 2002 – (a) Mapa de correntes Delft3D – (7/08/02 – 19:30 h – Sizígia – Vazante) – (b) Perfil da velocidade no Ponto ADCP-CODESP.....15

Figura 117 - Gráfico de Elevação da Superfície mostrando os instantes em que foram apresentados os mapas de correntes – Inverno 2002 15

Figura 118 - Resultado da simulação do Inverno de 2005 – (a) Mapa de correntes – Delft3D (30/07/2005 – 4:00 h – Quadratura - Vazante) – (b) Perfil da velocidade no Ponto ADCP-SABESP 15

Figura 119 - Resultado da simulação do Inverno de 2005 – (a) Mapa de correntes Delft3D – (07/08/05 – 14:00 h – Sizígia – Enchente) – (b) Perfil da velocidade no Ponto ADCP-SABESP 15

Figura 120 - Resultado da simulação do Inverno de 2005 – Mapa de correntes Delft3D – (08/08/05 – 21:00 h – Sizígia – Vazante) – (b) Perfil da velocidade no Ponto ADCP-SABESP 15

Figura 121 - Gráfico de Elevação da Superfície mostrando os instantes em que foram apresentados os mapas de correntes – Inverno 2005 15

Figura 122 – Trajetória e Velocidade (componente x e y) das correntes no ponto de Medição de Correntes (Ponto ADCP SABESP) – Inverno 2005 – Simulação Delft3D 15

Figura 123 - Gráficos de dispersão entre os valores da 'Componente x' da Velocidade de Corrente entre a Simulação Delft3D e Observações de Campo 15

Figura 124 - Velocidades e direção das correntes no Ponto de Lançamento do Emissário Submarino de Santos / São Vicente – Verão 2002 – Simulação Delft3D 15

Figura 125 - Velocidades e direção das correntes no Ponto de Lançamento do Emissário Submarino de Santos / São Vicente – Inverno 2002 – Simulação Delft3D 15

Figura 126 - Velocidades e direção das correntes no Ponto de Lançamento do Emissário Submarino de Santos / São Vicente – Inverno 2002 – Simulação Delft3D – Velocidades na Superfície, ½ Água e Fundo 15

Figura 127 - Velocidades e direção das correntes no ponto de lançamento do emissário submarino de Santos / São Vicente – Inverno 2005 – Simulação Delft3D 15

Figura 128 - Trajetória e Velocidade (componente x e y) das correntes no ponto de lançamento do emissário submarino de Santos / São Vicente – Verão 2002 – Simulação Delft3D – (a) Superfície, (b) ½ Água e (c) Fundo 15

Figura 129 - Localização dos pontos para teste da descarga turbinada em Cubatão 15

Figura 130 – Velocidade e direção das correntes no Ponto de Lançamento do Emissário Submarino de Santos / São Vicente considerando a vazão turbinada em Cubatão.....15

Figura 131 – Resultados das simulações considerando a vazão turbinada em Cubatão - Mapas de correntes (Delft3D) – 5 Cenários 15
Figura 132 - Resultados das simulações considerando a vazão turbinada em Cubatão - Mapas de correntes (Delft3D) – Cenário 2 e Cenário 5 – Com e Sem Vento - Enchente 15
Figura 133 - Resultados das simulações considerando a vazão turbinada em Cubatão - Mapas de correntes (Delft3D) – Cenário 2 e Cenário 5 – Com e Sem Vento - Vazante 15
Figura 134 – Comparação entre os dados de corrente medidos em campo e resultados das simulações com o POM, MIKE 21 e Delft3D – Verão 2002 – Velocidade Média na Profundidade – Ponto ADCP-CODESP 15
Figura 135 – Vista lateral da pluma para o Cenário 1 – Classe de Fluxo: MU8 - CORMIX.....15
Figura 136 – Vista lateral da pluma para o Cenário 5 – Classe de Fluxo: MS1 - CORMIX.....15

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites de Balneabilidade conforme Resolução CONAMA n.º 274/00 15

Tabela 2 - Atividades realizadas nos cruzeiros correntométricos na Praia Grande – (FUNDESPA, 1999) 15

Tabela 3 – Velocidade (cm/s) das correntes durante o verão para a região de Mongaguá. Dados utilizados pela FUNDESPA para estudos de dispersão....15

Tabela 4 – Freqüências, fases e amplitudes ao longo da Bordas paralela à linha de costa e correspondentes freqüências, fases e amplitudes para as Bordas Neumann – Delft3D....15

Tabela 5 – Condições iniciais e de contorno, parâmetros físicos e numéricos utilizados na modelagem tridimensional com o Delft3D....15

Tabela 6 - Localização dos pontos de medição de campo....15

Tabela 7 – Localização dos pontos de lançamento dos emissários submarinos 15

Tabela 8 - Dados de medição de corrente no ponto de lançamento do emissário submarino de Santos / São Vicente. Fonte: SABESP (2006) 15

Tabela 9 – Dados de medição de campo de salinidade e temperatura – FUNDESPA (1999)....15

Tabela 10 - Dados de medição de campo de salinidade e temperatura – SABESP (2006)....15

Tabela 11 – Valores de salinidade e temperatura utilizados nas simulações com o Delft3D 15

Tabela 12 – Parâmetros utilizados na calibração – Delft3D....15

Tabela 13 – Coeficientes de correlação para as simulações de calibração do Delft3D 15

Tabela 14 – Vazão de Fluxo Efetivo afluente à Baía de Santos (HIDROCONSULT, 1974)....15

Tabela 15 – Parâmetro adotados nas simulações considerando a vazão turbinada em Cubatão....15

Tabela 16 – Velocidades máximas e mínimas das medições de campo no ponto de lançamento do Emissário submarino de Santos / São Vicente....15

Tabela 17 – Cenários de simulação para o Campo Próximo 15

Tabela 18 – Resultados das simulações com CORMIX 2 – Campo Próximo 15

Tabela 19 – Características dos Modelos utilizados 15

Tabela 20 – Avaliação quanto ao “Grau de Dificuldade” de utilização e “Recursos Disponíveis” dos modelos implementados....15

Tabela 21 – Tempo de processamento e tamanho dos arquivos de resultados gerados pelo MIKE 21 no período de simulação de 9/2/2002 a 10/3/2002....15

Tabela 22 - Tempo de processamento e tamanho dos arquivos de resultados gerados pelo Delft3D nos períodos de simulação....15

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

ADCP	Acoustic Doppler Current Profiles
BNDO	Banco Nacional de Dados Oceanográficos
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CODESP	Companhia Docas do Estado de São Paulo
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CORMIX	Cornell Mixing Zone Expert System
DAEE	Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo
DHI	Danish Hydraulic Institute
DHN	Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil
EPC	Estação de Pré-condicionamento
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade São Paulo
FCTH	Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica
FEMAR	Fundação de Estudos do Mar
FUNDESPA	Fundação de Estudos e Pesquisas Aquáticas
IMO	International Maritime Organization
MDF	Master Definition Flow
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NCEP	National Center for Environmental Prediction
NOAA	National Oceanic & Atmospheric Administration
POM	Princeton Ocean Model
RAMS	Regional Atmospheric Modeling System
RMBS	Região Metropolitana da Baixada Santista
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SDO	Sistema de Disposição Oceânica
SisBAHIA	Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental
UNISANTA	Universidade Santa Cecília
USEPA	United States Environmental Protection Agency
WASP	Water Quality Analysis Simulation Program

SUMÁRIO

Resumo
Abstract
Lista de Figuras
Lista de Tabelas
Lista de Abreviaturas e Siglas

1 INTRODUÇÃO 15
1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS 15
1.2 JUSTIFICATIVA 15
2 OBJETIVOS DO ESTUDO 15
2.1 OBJETIVO PRINCIPAL 15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 15
3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E DOS EFLUENTES LANÇADOS NA RMBS 15
3.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO 15
3.2 ASPECTOS DE POLUIÇÃO AMBIENTAL DA ÁREA DE ESTUDO 15
3.3 ASPECTOS GERAIS SOBRE A GEOGRAFIA E A CIRCULAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO 15
3.4 CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS EFLUENTES LANÇADOS NOS MARES E OCEANOS 15
3.4.1 Efluentes de esgotos 15
3.4.2 Óleos derivados do petróleo e água de lastro dos navios 15
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 15
4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS 15
4.2 MODELAGEM MATEMÁTICA DA HIDRODINÂMICA 15
4.2.1 Métodos de resolução numérica dos modelos matemáticos 15
4.2.1.1 Método das Diferenças Finitas 15
4.2.1.2 Método dos Volumes Finitos 15
4.2.1.3 Método dos Elementos Finitos 15
4.3 MODELAGEM MATEMÁTICA DA DISPERSÃO DA PLUMA 15
4.3.1 Modelagem de Campo Próximo 15
4.3.2 Modelagem de Campo Afastado 15
4.4 ESTUDOS ANTERIORES 15
4.4.1 Trabalhos de modelagem matemática que incluem a Baixada Santista 15
4.4.2 Trabalhos de modelagem matemática de interesse para o estudo 15
4.4.3 Trabalhos de coleta de dados da região de estudo 15
4.4.4 Considerações Finais sobre os Estudos Anteriores 15
5 DESCRIÇÃO CONCEITUAL DOS MODELOS MATEMÁTICOS UTILIZADOS 15
5.1 MIKE 21 15
5.1.1 Considerações Iniciais 15
5.1.2 Ferramentas do MIKE 21 – Geração de Vento 15
5.1.3 Condições de contorno – "Transfer Boundary" 15
5.2 PRINCETON OCEAN MODEL – POM 15
5.2.1 Considerações Iniciais 15
5.2.2 Características do Modelo 15

5.2.3 Equações Básicas *15*
5.3 DELFT3D 15
5.3.1 Considerações iniciais *15*
5.3.2 Características do Modelo – Delft3D-FLOW *15*
5.3.3 Equações Hidrodinâmicas Governantes *15*
5.3.4 Condições de Contorno *15*
5.3.5 Definindo as condições de contorno com as bordas Neumann *15*
5.4 CORMIX 15
5.4.1 Descrição do Modelo *15*
6 METODOLOGIA 15
6.1 ESTRUTURAÇÃO DA TESE 15
6.2 METODOLOGIA EMPREGADA NA MODELAGEM MATEMÁTICA 15
6.2.1 Modelagem Hidrodinâmica – MIKE 21 ..... *15*
6.2.1.1 Características e parâmetros empregados na Modelagem de Meso-escala 15
6.2.1.2 Características e parâmetros empregados na Modelagem da Baixada Santista 15
6.2.1.3 Características e parâmetros empregados na Modelagem do Estuário e Baía de Santos 15
6.2.2 Modelagem Hidrodinâmica – POM *15*
6.2.2.1 Metodologia empregada na modelagem 15
6.2.3 Modelagem Hidrodinâmica – Delft3D *15*
6.2.3.1 Metodologia empregada na modelagem 15
6.2.4 Modelagem de Dispersão da Pluma (Campo Próximo) – CORMIX *15*
6.2.4.1 Metodologia empregada na modelagem 15
7 BASE DE DADOS 15
7.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS 15
7.2 BATIMETRIA 15
7.3 VENTO 15
7.4 MARÉ 15
7.4.1 Considerações gerais *15*
7.5 CORRENTES 15
7.6 SALINIDADE E TEMPERATURA 15
8 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES 15
8.1 SIMULAÇÕES COM O MIKE 21 15
8.1.1 Simulações de Calibração *15*
8.1.2 Elevação da Superfície *15*
8.1.3 Resultados das Simulações de Meso-escala - Correntes *15*
8.1.4 Resultados das Simulações da Baixada Santista - Correntes *15*
8.1.5 Resultados das Simulações do Estuário e Baía de Santos - Correntes *15*
8.1.6 Comparação entre os resultados das três grades *15*
8.1.7 Correlação dos resultados *15*
8.1.8 Trajetórias traçadas a partir das Áreas de Fundeadouros do Porto de Santos *15*
8.1.9 Correntes no Ponto de Lançamento do Emissário Submarino de Santos / São Vicente – MIKE 21 ..... *15*
8.2 SIMULAÇÕES COM O POM 15
8.2.1 Elevação da Superfície *15*
8.2.2 Resultados das Simulações - Correntes *15*
8.2.3 Correlação dos Resultados *15*
8.2.4 Correntes no Ponto de Lançamento do Emissário Submarino de Santos / São Vicente – POM 15
8.3 SIMULAÇÕES COM O DELFT3D 15
8.3.1 Simulações de Calibração *15*
8.3.2 Elevação da Superfície *15*
8.3.3 Resultados das Simulações - Correntes *15*
8.3.4 Correlação dos Resultados *15*
8.3.5 Correntes no Ponto de Lançamento do Emissário Submarino de Santos / São Vicente – Delft3D 15

8.3.6 Verificação do modelo com a descarga turbinada em Cubatão *15*
8.4 COMPARAÇÃO DIRETA ENTRE OS TRÊS MODELOS 15
8.5 SIMULAÇÕES COM O CORMIX 15
8.5.1 Cenários de Simulação *15*
8.5.2 Resultados das Simulações *15*
9 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS 15
9.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS 15
9.2 A BASE DE DADOS UTILIZADA E REVISÃO DOS TRABALHOS ANTERIORES 15
9.3 A UTILIZAÇÃO DOS MODELOS 15
9.4 OS RESULTADOS DOS MODELOS MATEMÁTICOS HIDRODINÂMICOS 15
9.4.1 MIKE 21 ..... *15*
9.4.2 POM *15*
9.4.3 Delft3D *15*
9.4.4 Comparação dos resultados dos modelos hidrodinâmicos *15*
9.5 CARACTERIZAÇÃO DA HIDRODINÂMICA DA CIRCULAÇÃO LOCAL 15
9.6 A PREVISÃO DE DISPERSÃO DE EFLUENTES NA REGIÃO 15
9.6.1 Dispersão da pluma do Emissário Submarino de Santos / São Vicente *15*
9.6.2 Dispersão de manchas de óleos na Baixada Santista *15*
9.7 A APLICABILIDADE DOS RESULTADOS OBTIDOS 15
9.8 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 15
10 CONCLUSÕES 15
11 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 15

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

O aumento da consciência ambiental tem provocado os cientistas e engenheiros a focarem suas atenções no problema de prever a hidrodinâmica da circulação das águas e a dispersão de contaminantes nos corpos d'água. Este problema se agrava quando falamos em regiões costeiras, nas quais vive a grande maioria da população.

Informações confiáveis da hidrodinâmica da circulação e da qualidade das águas, e do transporte de sedimentos têm sido obtidas através de ferramentas apropriadas de modelagem matemática.

Entende-se que a dispersão de um efluente no oceano é extremamente complexa e, para compreender seu comportamento, deve-se levar em consideração, no mínimo, fatores como o tipo de efluente, os pontos de descarga dos mesmos, a hidrodinâmica das correntes marítimas, os efeitos das marés, os efeitos meteorológicos, a batimetria do fundo marinho e os contornos terrestres. Além disso, sabe-se que os sistemas atmosféricos e oceânicos interagem de forma muito complexa. A combinação de efeitos meteorológicos e oceânicos exerce forte influência sobre áreas litorâneas, visto que ventos fortes e temporais podem causar elevações ou descidas do nível do mar e, até mesmo, afetar o comportamento das correntes costeiras, numa extensão de centenas de quilômetros, além de durar vários dias.

Os tipos mais comuns de efluentes leves, sujeitos a empuxo positivo por serem menos densos do que as águas do mar, são:

- Esgotos sanitários provenientes de disposição oceânica de emissários submarinos ou por poluição difusa;
- Vazamentos acidentais de hidrocarbonetos e/ou produtos químicos em áreas de complexos portuários e industriais;
- Descarga de águas de lastro de navios.

Os esgotos sanitários de municípios litorâneos são muitas vezes lançados no mar através de emissários submarinos. A qualidade destes esgotos lançados no ambiente marinho varia de acordo com o nível de tratamento recebido pelo efluente. Por outro lado, existem os esgotos lançados no mar de maneira difusa, os quais não recebem nenhum tratamento e nenhum controle dos órgãos ambientais. Assim, os pontos de descarga podem ser pontuais, através dos emissários submarinos, ou não pontuais (difusos) quando os esgotos são lançados através de canais naturais ou artificiais poluídos com esgoto doméstico. Da mesma forma, o esgoto não doméstico e o efluente industrial podem atingir o mar.

Os efluentes lançados ao mar de maneira acidental proveniente de vazamento de navios são comumente petróleo e seus derivados, que vazam dos cascos dos navios após avarias. Em regiões costeiras e estuarinas os ecossistemas são bastante vulneráveis aos impactos provocados por vazamentos de óleo, principalmente porque a maioria dos acidentes ocorre nas áreas portuárias, onde se concentram os navios, terminais e operações de carga e descarga.

Regiões costeiras próximas a portos marítimos, pelos quais se movimenta o comércio exterior (navegação de longo curso) e a navegação de cabotagem (entre portos nacionais), também são sujeitas à poluição através das águas de lastro dos navios.

As interações envolvidas no transporte destes efluentes são muito complexas e teoricamente as forçantes geradoras são maré, diferenças de salinidade e temperatura, vento, descargas de água doce e movimento das ondas.

Tanto os estudos de disposição oceânica de esgotos sanitários através de emissários submarinos, quanto os estudos de avaliação do caminhamento de derrames acidentais por vazamentos de navios, requerem o conhecimento das características geométricas e dinâmicas do corpo d'água receptor. As características geométricas são estabelecidas através do conhecimento da batimetria de fundo e dos contornos da linha de costa. As características dinâmicas são estabelecidas através do conhecimento da hidrodinâmica das correntes marítimas, assim como o pleno entendimento da variabilidade inerente aos oceanos e às suas tendências de longo termo.

Neste ponto faz-se necessário salientar que o lançamento de efluentes ao mar, de maneira planejada ou acidental, incorre em contaminação do ambiente marinho, o que pode reduzir sua biodiversidade e interferir nos seus fluxos de energia.

O comportamento de um dado poluente no ambiente marinho pode ser estudado, através de métodos de modelagem numérica e/ou modelo físico, a partir de uma adequada fundamentação em base de dados de medição de campo para calibrar e validar os modelos.

O conhecimento científico pormenorizado da hidrodinâmica de regiões costeiras como a Baixada Santista, que recebem efluentes domésticos através de emissários submarinos e são vulneráveis à ocorrência de derrames ou vazamentos de navios, oferece subsídio para o melhor equacionamento e elaboração de soluções desses problemas como, por exemplo, a otimização de projetos de obras de Engenharia Costeira, planejamento e gestão de regiões costeiras, programas de preservação do ambiente marinho, entre outros.

1.2 Justificativa

No contexto aqui apresentado, e devido à importância econômica da Região Metropolitana da Baixada Santista, principalmente por abrigar o Porto de Santos, o Pólo Industrial de Cubatão e municípios litorâneos de vocação turística, somado ao fato do delicado estágio de contaminação em que se encontra o Estuário e Baía de Santos, entende-se que são relevantes os estudos científicos que abordam as questões até aqui apresentadas.

Os modelos matemáticos representam os fenômenos da natureza através de equações diferenciais fundamentais. Estas equações matemáticas necessitam do uso de coeficientes que devem ser obtidos por medições na natureza, ou mesmo em modelos físicos. Na modelagem matemática, nem sempre é possível a resolução das equações completas, e por isso faz-se necessário desprezar alguns termos e formular hipóteses sobre a distribuição espacial de certas grandezas, ou discretizar o tempo e o espaço. A escolha adequada do tipo de modelo e das hipóteses simplificadoras é fundamental para a qualidade dos resultados obtidos. Os dados de

medição em campo são importantíssimos na etapa de inicialização, calibração e validação dos modelos matemáticos.

Soma-se a isso, o fato de que a modelagem matemática e o cálculo computacional terem adquirido nas últimas décadas uma importância evidente, e fez com que engenheiros ligados à área de recursos hídricos e saneamento se vissem forçados a se inteirarem do assunto. Sendo assim, é desejável formar engenheiros com base matemática mais sólida e esta necessidade exige um grau de especialização. Portanto, está retratada nesta Tese a visão de um profissional de Engenharia e sua experiência na utilização e análise da modelagem matemática como ferramenta na avaliação da dispersão de efluentes leves na região costeira da Baixada Santista.

De maneira mais específica, com este trabalho demonstra-se ser possível avaliar a hidrodinâmica das correntes marítimas do litoral da Baixada Santista utilizando modelos matemáticos hidrodinâmicos bidimensional e tridimensional. A partir dos resultados da modelagem hidrodinâmica avalia-se a dispersão de efluentes leves no litoral da Baixada Santista, e principalmente no Estuário e Baía de Santos, através da modelagem de dispersão da pluma de emissário em campos próximo e afastado.

2 OBJETIVOS DO ESTUDO

2.1 Objetivo Principal

Para a região da Baixada Santista, abordada nessa Tese, o principal objetivo é fazer uma análise crítica da utilização da ferramenta de modelagem matemática na avaliação da dispersão de efluentes leves na região. Para a efetivação desta análise são utilizados três modelos hidrodinâmicos e um modelo especialista de dispersão (campo próximo).

Esta Tese tem como premissa dar continuidade aos estudos de modelagem matemática, realizados por Baptistelli (2003).

Admite-se que modelos matemáticos possam ser utilizados por engenheiros na análise hidrodinâmica de regiões costeiras como subsídio da gestão destas regiões, seja na elaboração de projetos de emissários submarinos, como no controle da poluição causada por derrames de hidrocarbonetos. Assim, procura-se apresentar uma análise crítica, fornecendo subsídio para que o engenheiro possa se familiarizar e alinhar seus conceitos quanto à utilização de modelagem matemática hidrodinâmica na gestão da Engenharia Costeira, sendo o estudo de caso a Região Metropolitana da Baixada Santista, com ênfase no Sistema Estuarino de Santos / São Vicente.

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos a serem obtidos neste trabalho são:

❒ Caracterizar a hidrodinâmica das correntes marítimas no litoral da Baixada Santista do Estado de São Paulo, através da análise estatística dos dados observados em campo e da implementação de modelagem matemática, através dos modelos numéricos hidrodinâmicos: MIKE 21, Delft3D e POM.

❒ Avaliar o comportamento da dispersão de esgoto sanitário devido ao padrão hidrodinâmico das correntes marítimas no litoral da Baixada Santista, através da modelagem de dispersão da pluma do emissário submarino de Santos / São Vicente (campo próximo).

❒ Avaliar o comportamento hidrodinâmico da Baía de Santos através da modelagem matemática em modelo tridimensional.

❒ Abordar a questão da poluição do mar de maneira qualitativa, buscando avaliar áreas de maior circulação, áreas de estagnação das águas, áreas mais sujeitas à contaminação, etc., levando-se em consideração a poluição causada por efluentes leves (petróleo e derivados, esgotos domésticos e águas de lastro dos navios).

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E DOS EFLUENTES LANÇADOS NA RMBS

3.1 Descrição da área de estudo

A Região Metropolitana da Baixada Santista (RMBS), instituída pela Lei Complementar n.º 815/96 em 30 de julho de 1996, situa-se ao longo do litoral do Estado de São Paulo, numa extensão de 160 km, compreendendo os municípios de Santos, São Vicente, Cubatão, Guarujá, Bertioga, Praia Grande, Mongaguá, Itanhaém e Peruíbe. Santos é a principal cidade na hierarquia urbana entre as cidades que conformam a região. De acordo com estimativa do IBGE (2006) a Baixada Santista possui uma população residente fixa de 1.637.565 habitantes (estimativa para julho/2005), distribuídos em aproximadamente 2.887 km^2. Esta região pode ter sua população em quantidade dobrada nos períodos de temporada.

A Baixada Santista apresenta-se como o segmento mais dinâmico do Litoral Paulista, apoiando-se nas atividades portuárias e no Complexo Industrial de Cubatão. No nível intra-regional pode ser reconhecida como desdobrada em duas funções: com função urbana-portuária-industrial, compreendendo Santos, São Vicente, Cubatão, inclusive o distrito de Vicente de Carvalho, pertencente ao município de Guarujá; e com função de lazer e turismo, compreendendo os demais municípios. A região também possui ecossistemas de enorme importância econômico-ambiental, como os Canais do Porto de Santos, de São Vicente e de Bertioga.

O Brasil é um país com uma linha costeira de mais de 8.500 km, tem 17 Estados da Federação compondo esta linha de costa e possui portos pelos quais passam mercadorias de exportação e importação da economia brasileira. De acordo com Alfredini (2005), dos mais de quarenta principais portos comerciais marítimos brasileiros, o Porto de Santos é o porto de maior movimentação de carga geral, e o segundo em carga total embarcada e desembarcada (dados de 2002). Sendo carga geral a mercadoria de elevado valor unitário, como a que é transportada em contêineres, avalia-se que em 2004 27% do comércio exterior brasileiro passou pelo Porto de Santos. Na Figura 1 está apresentada a localização geográfica da região da Baixada Santista.

Figura 1 – Localização geográfica da área de estudo – Litoral da Baixada Santista

3.2 Aspectos de Poluição Ambiental da Área de Estudo

As águas dos mares e oceanos são, em grande medida, responsáveis por garantir o clima e ajudam a manter o ciclo de chuvas no planeta. Além disso, os oceanos são habitados por milhares de espécies de seres vivos, entre eles as algas, o plâncton e os animais marinhos, que são uma rica fonte de alimento para outros animais, inclusive os seres humanos.

A Zona Costeira Brasileira abriga ecossistemas dos mais diversificados e de alta relevância ambiental, como mangues, restingas, campos de dunas, estuários, lagunas, deltas, recifes de corais, costões, entre outros, possuindo significativa riqueza natural e ambiental, o que exige uma ordenação no processo de ocupação, gestão e controle (ALFREDINI, 2005).

Atividades antrópicas incidentes sobre ecossistemas costeiros são bastante notadas e são proporcionais ao desenvolvimento econômico das regiões litorâneas. A elevada quantidade de resíduos produzidos gera impactos nas zonas costeiras, que são ricas em produtividade biológica e em sua biodiversidade.

A falta de coleta e tratamento dos esgotos sanitários lançados “in natura” nos córregos afluentes às praias, ou lançados diretamente nos oceanos, os acidentes de derrames de produtos contaminantes através de vazamentos dos navios e a questão da água de lastro dos navios, são problemas que merecem atenção para a gestão de ambientes costeiros. Outras fontes de poluição que ameaçam nossos oceanos são exploração excessiva dos recursos biológicos do mar e alteração/destruição física do habitat marinho.

A Região Metropolitana da Baixada Santista, de acordo com o Relatório de Gestão Empresarial da SABESP (junho/2006) apresenta índices de atendimento dos domicílios urbanos com coleta de esgotos de 55% e índice de tratamento de esgotos coletados de 99%. Para o tratamento destes esgotos, a região possui nove estações de tratamento de esgotos, além de quatro emissários submarinos, responsáveis por dispor no mar esgotos previamente tratados em estações de pré-condicionamento.

Na Figura 2 é apresentada uma foto aérea que mostra a cidade e o Porto de Santos.

Figura 2 – Foto aérea da Baía de Santos mostrando a Cidade e o Porto de Santos. Na indicação (com seta) está a visualização do contorno da pluma do efluente lançado pelo emissário de Santos / São Vicente. (Fonte: BLENINGER, 2006)

Os sistemas de esgotamento sanitários têm objetivo de minimizar os impactos decorrentes da poluição dos cursos d'água preservando o meio ambiente e promovendo melhores condições de saúde pública.

Os Sistemas de Disposição Oceânica (SDO) dos esgotos sanitários, através de emissários submarinos, apresentam-se como solução viável e segura para as populações das cidades litorâneas, desde que os esgotos passem por um tratamento prévio adequado, que os SDO tenham um projeto devidamente estudado e que o emissário seja adequadamente localizado. Os SDO são destinados a promover nos esgotos basicamente três processos, a saber:

- diluição inicial através de difusão turbulenta e carreamento forçado controlados pelo fluxo de quantidade de movimento, empuxo e geometria do difusor;
- dispersão por advecção e difusão turbulenta promovendo o transporte de massa; e
- decaimento bacteriano, isto é diminuição da atividade bacteriana por ação de raios UV, predadores naturais, escassez de nutrientes e choque osmótico.

No entanto, a disposição oceânica dos efluentes por emissários submarinos, e a conseqüente avaliação da dispersão destes efluentes, geram preocupações e cuidados especiais por parte das empresas possuidoras destes sistemas e dos órgãos ambientais de controle.

Com relação aos vazamentos de óleo, sabe-se que desde a década de 1930 até os dias atuais, a indústria de petróleo vem crescendo progressivamente. Neste desenvolvimento foram descobertos novos campos petrolíferos, aperfeiçoadas as explorações submarinas, construídos superpetroleiros transoceânicos, inaugurados e ampliados terminais de carga e descarga de petróleo. Em função da grande movimentação de petróleo por transporte marítimo, foi registrado em 1967 o primeiro grande desastre ambiental documentado, devido ao encalhe do petroleiro Torrey Canyon, entre a costa da Inglaterra e França. Desde então outros casos ocorreram envolvendo navios, portos, terminais, oleodutos e refinarias. No Brasil, os episódios envolvendo derramamento de grande volume de óleo (acima de 6.000 m^3) ocorreram com petroleiros. Dentre os incidentes que provocaram os maiores impactos ambientais no litoral do Estado de São Paulo podem ser citados os seguintes derrames:

- o rompimento do oleoduto São Sebastião-Cubatão (2.500 m^3), em novembro de 1983, no manguezal de Bertioga;
- a colisão do N/T Marina (2.000 m^3), em março de 1985, em São Sebastião;
- o rompimento do oleoduto São Sebastião-Cubatão, em maio de 1994, (2.700 m^3); e
- a colisão envolvendo o N/M Smyrni no Porto de Santos, em julho de 1998 (40 m^3).

A CETESB dispõe de um Cadastro de Acidentes Ambientais (CADAC) que, de janeiro de 1978 a agosto de 2002, registrou 4.841 ocorrências para o Estado de São Paulo. Deste número total, a grande maioria dos casos, 2.661 (51%), ocorreu na Região Metropolitana de São Paulo, 534 (11%) na Baixada Santista e 247 (0,5%) no litoral norte (CETESB, 2006).

Os restos de combustível dos grandes navios e os vazamentos de plataformas de petróleo afetam os seres vivos. Algas e peixes morrem, animais marinhos são intoxicados e inúmeras aves ficam com as penas cheias de óleo e afundam. Portanto, um evento de derramamento de óleo provoca uma série de efeitos nocivos ao ambiente marinho. O espalhamento da camada de óleo sobre a superfície da água do mar é um fenômeno que se processa ao longo de vários dias.

Conforme Alfredini (2005), a velocidade de deslocamento da mancha de óleo é praticamente determinada pela corrente marítima e a ação do vento. Durante o vazamento do produto, o óleo movimenta-se com o vento, sendo que neste local a espessura é maior e apresenta pouca largura. No caminhamento da mancha, a mesma alarga-se e a película de óleo fica mais fina à medida que a distância do ponto de vazamento vai aumentando.

Outra forma de poluição, a introdução de espécies marinhas exóticas em diferentes ecossistemas, por meio da água do lastro dos navios, por incrustação no casco e via outros vetores, é identificada como uma das maiores ameaças aos oceanos do mundo. A água de lastro é absolutamente essencial para a segurança e eficiência das operações de navegação modernas, proporcionando equilíbrio e estabilidade aos navios mais aliviados. Entretanto, isso pode causar sérias ameaças ecológicas e econômicas à saúde.

Os navios carregaram lastro sólido, na forma de pedras, areia ou metais, por séculos. Nos dias atuais, as embarcações passaram a usar a água como lastro, o que facilita bastante a tarefa de carregar e descarregar um navio, além de ser mais econômico e eficiente do que o lastro sólido. Quando um navio está aliviado, seus tanques recebem água de lastro para manter sua estabilidade ao movimento de balanço e integridade estrutural. Quando o navio é carregado, a água é lançada ao mar. Assim, os navios podem passar a transportar espécies biologicamente exóticas e outros contaminantes para o porto de destino. Estas espécies exóticas podem ser infectantes ou predadoras da fauna e flora aquáticas noutras áreas onde o navio descarregará o lastro.

A grande maioria das espécies levadas na água de lastro não sobrevive à viagem por conta do ciclo de enchimento e despejo do lastro, e das condições internas dos tanques, hostis à sobrevivência de muitos dos organismos. Mesmo para aqueles que continuam vivendo depois da jornada, e são jogados no mar, as

probabilidades de sobrevivência em novas condições ambientais, incluindo ações predatórias e/ou competições com as espécies nativas, são bastante reduzidas. No entanto, quando todos os fatores são favoráveis, uma espécie introduzida, ao sobreviver e estabelecer uma população reprodutora no ambiente hospedeiro, pode tornar-se invasora, competindo com as espécies nativas e se multiplicando em proporções epidêmicas. Ao contrário de outras formas de poluição marinha, como derramamentos de óleo, em que ações mitigadoras podem ser tomadas e o meio ambiente pode eventualmente se recuperar, a introdução de espécies marinhas pode se tornar irreversível.

A água de lastro, por ser um problema global, tem sido o tema mais importante nas discussões ambientais da IMO (International Maritime Organization) e motivo de grandes palestras e convenções. No Brasil estima-se que cerca de 40 milhões de toneladas/ano de água de lastro são lançadas em nosso ambiente marinho. Um sistema de gerenciamento e controle pode reduzir a probabilidade de introdução de espécies indesejáveis. A troca de água de lastro em alto-mar (profundidades superiores a 500 metros) é um dos mais efetivos métodos preventivos. Como opção de tratamento, o mesmo deve ser seguro, de baixo-custo e ambientalmente aceitável. Diversos métodos de tratamento vêm sendo testados, entre ele: a filtração, o tratamento térmico, aplicação de biocidas, tratamento elétrico, ultravioleta, acústico, de oxigenação e biológico. A CODESP proibiu qualquer tipo de despejo, incluindo a água de lastro, sobre cais e píeres e, realiza monitoramento do ambiente marinho, o que é imprescindível no controle e gerenciamento do problema (PORTO DE SANTOS, 2007).

Assim, pode-se notar que o Sistema Estuarino de Santos, inserido na Região Metropolitana da Baixada Santista, está sujeito a várias fontes de poluição e representa atualmente um importante exemplo brasileiro de degradação ambiental por poluição hídrica em ambientes costeiros.

3.3 Aspectos gerais sobre a geografia e a circulação da área de estudo

A Baixada Santista encontra-se inserida na região do Atlântico Sul conhecida como Bacia de Santos. Conforme relatório da FUNDESPA (1998), a Bacia de Santos é definida por alguns autores como a área oceânica estendendo-se desde as proximidades da Cadeia Vitória Trindade, aproximadamente 20ºS, até cerca de 30ºS.

Na Baixada Santista encontra-se a região denominada por Praia Grande, que compreende os municípios de Praia Grande, Mongaguá, Itanhaém e Peruíbe e faz parte de uma planície costeira que apresenta praias retilíneas e extensas (BAPTISTELLI, 2003). O litoral da Praia Grande não tem acidentes geográficos notáveis, sendo praticamente retilíneo. Trata-se de uma região de plataforma continental aberta, que está sob influência direta das massas de água e movimentos da plataforma continental adjacente. A topografia do fundo submarino é praticamente uniforme e as isóbatas de 10, 20 e 30 m seguem aproximadamente na direção paralela à linha de costa. A descarga de água fluvial direta para a região, que contribui para a formação da massa de água costeira, tem como principal fonte o Rio Itanhaém, com vazão média anual moderada estimada em 50 m^3/s, mas com variação sazonal acentuada, com vazão máxima bianual da ordem de 250 m^3/s (GÓIS, 2004). Os rios Mongaguá e Preto (Peruíbe), além de pequenos córregos também contribuem localmente para a diluição da água do mar (Figura 3).

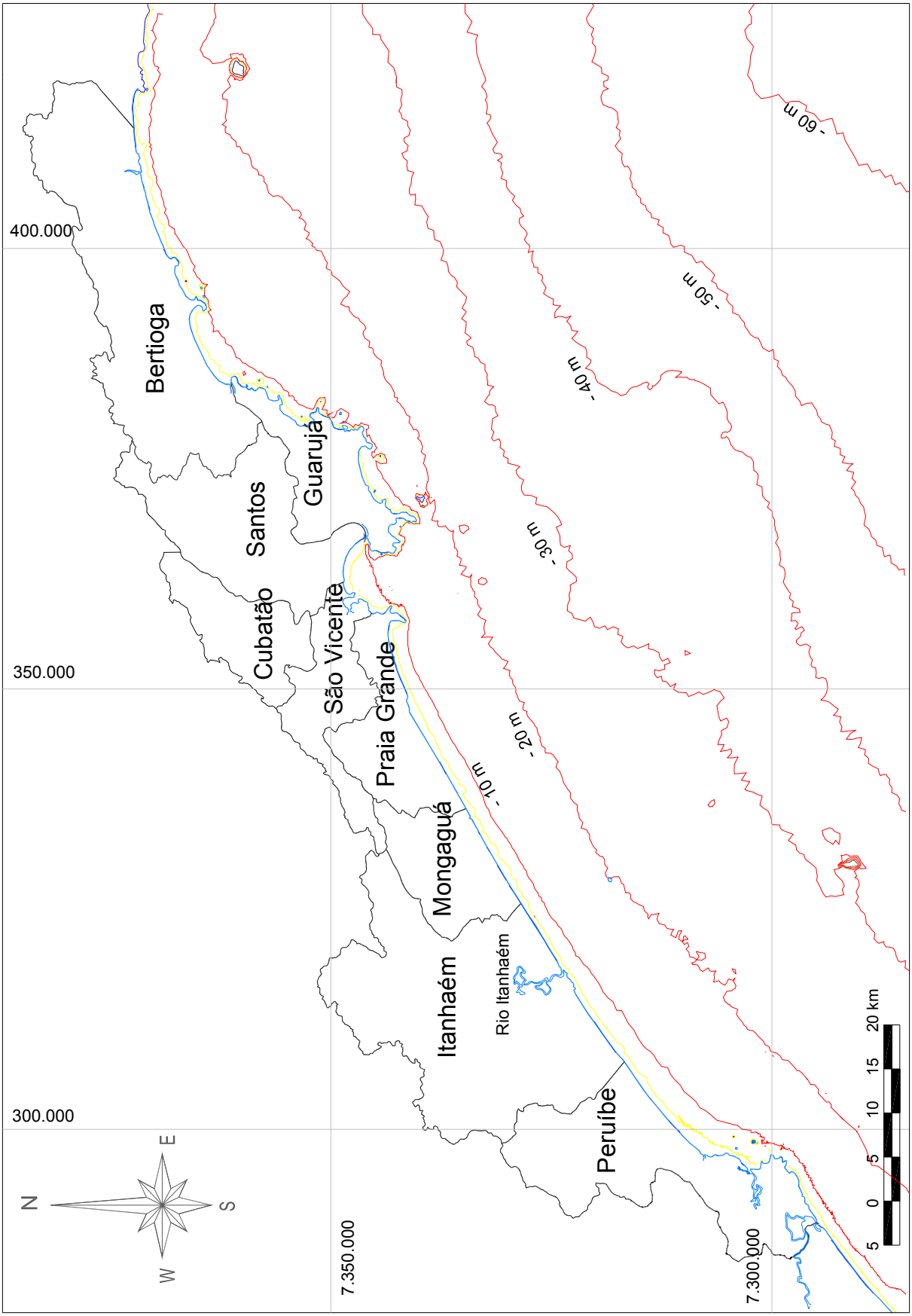


Figura 3 – Aspectos gerais sobre a área de estudo – Baixada Santista

Também inserido na Baixada Santista, o Sistema Estuarino de Santos e São Vicente pode ser dividido em três regiões: Baía de Santos, Estuário de Santos e Estuário de São Vicente. Os estuários são regiões de transição entre o fluxo unidirecional de água doce e o oceano, salino e influenciado pela maré.

Geograficamente, a Baía de Santos está delimitada ao norte pelas praias de Santos e São Vicente, ao sul pela linha imaginária que une a Ponta de Itaipú à Ponta da Munduba, à leste pela barra do Porto de Santos e os Morros dos Limões e da Barra e à oeste pela Barra de São Vicente e pelos Morros do Japuí, Xixová e Itaipu (Figura 4). O seu eixo N-S tem cerca de 6,7 km e o eixo E-W cerca de 6,8 km. A declividade do fundo é suave, as profundidades variam de 0 a 13 m, ao longo do seu eixo N-S. A área total da região estuarina de Santos, incluindo a baía, é da ordem de 100 km^2 (HIDROCONSULT, 1974).

A Baía de Santos recebe influência de águas oceânicas através da seção que une a Ponta de Itaipu à Ponta da Munduba e contribuição de água doce dos estuários de Santos e São Vicente. As águas de origem continental são provenientes do sistema estuarino através dos Canais de Piaçaguera à leste e do Mar Pequeno (Barra de São Vicente) à oeste.

O Sistema Estuarino de Santos / São Vicente é alimentado por um conjunto de mananciais provenientes das encostas da Serra do Mar e de origem da própria baixada. Os rios que nascem na Serra do Mar apresentam um regime torrencial; porém, devido à pequena declividade da baixada, mudam de regime, dificultando o escoamento das águas. Este fenômeno origina o labirinto de canais e meandros, característicos desta região (SABESP, 2006).

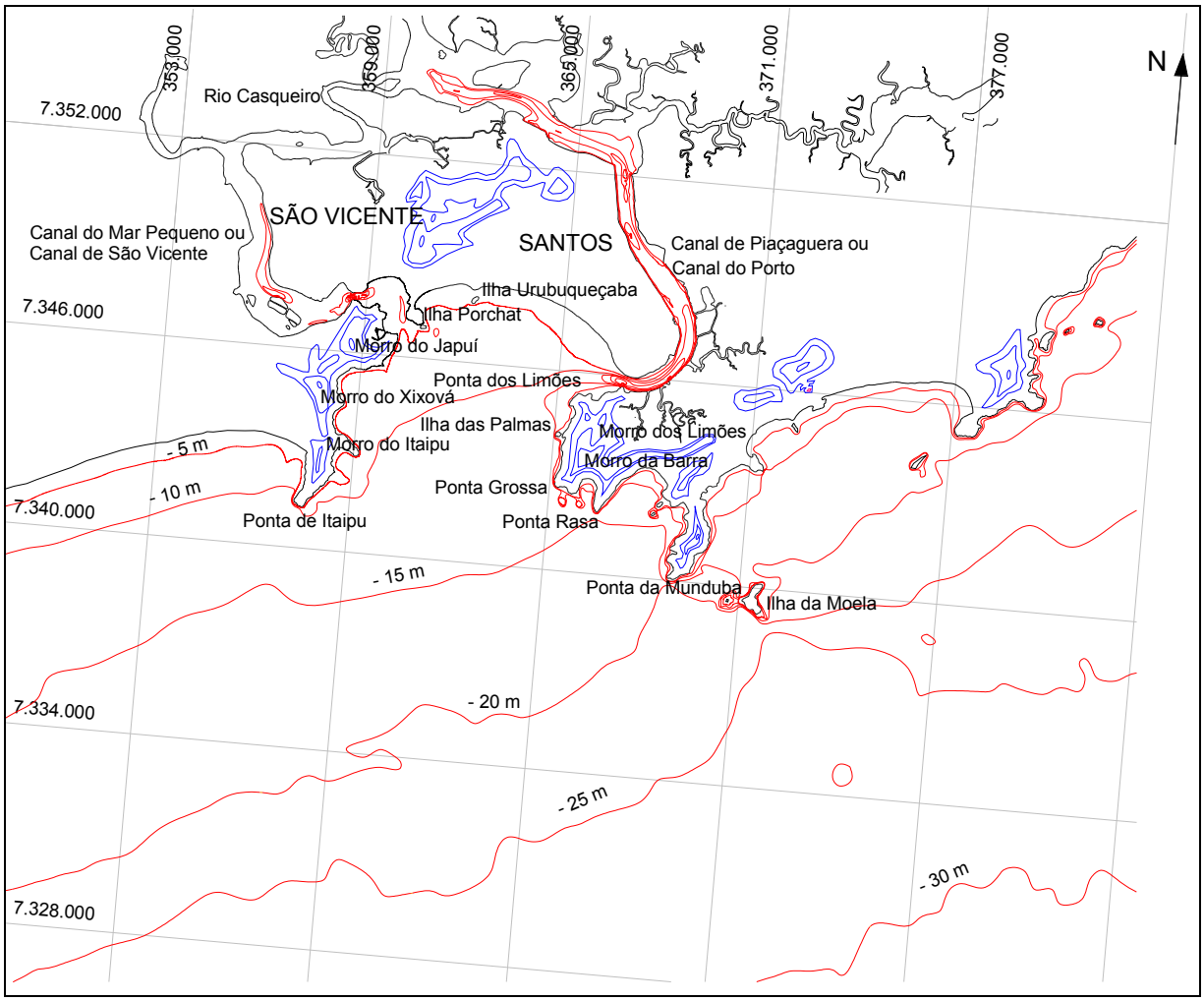


Figura 4 – Aspectos gerais sobre a área de estudo – Sistema Estuarino de Santos e São Vicente

Conforme HIDROCONSULT (1974), o mecanismo de circulação e renovação das águas da Baía de Santos é basicamente determinado pelas correntes de maré. Do ponto de vista astronômico, as marés são semi-diurnas com desigualdades diurnas, além disso, sua propagação no Estuário é condicionada por três fatores:

- a existência de eixos distintos de enchente e vazante;
- a presença de vastas áreas de mangues, que influem sobre o escoamento no canal principal, por serem regiões de armazenamento, com circulação própria;
- o encontro do Estuário de São Vicente com o de Santos, em torno do Rio Casqueiro.

Somado a isso ocorrem as perturbações transientes de ordem meteorológica, representadas pelas frentes frias.

Desta forma, o regime de circulação de águas na baía é relevante e mostra que as desembocaduras dos estuários de São Vicente e de Santos têm papel preponderante sobre ele, funcionando como ponto de atração e dispersão de fluxos, que comandam a orientação regional das correntes.

3.4 Características gerais dos efluentes lançados nos mares e oceanos

Os efluentes, ao serem lançados nos mares e oceanos, podem apresentar comportamentos distintos, dependendo de sua constituição. E ainda, quando lançados em estuários e baías os poluentes presentes nos efluentes podem sofrer processos físicos, químicos e biológicos. O poluente pode também ter comportamento diferente, dependendo das formas como se encontram, quais sejam, na forma dissolvida ou na forma particulada. Um poluente pode ser caracterizado através da medida de sua concentração.

3.4.1 Efluentes de esgotos

No caso dos esgotos, classificados conforme o seu uso predominante, eles podem ser de origem comercial, industrial ou doméstica, e apresentarem características diferentes, de acordo com sua origem. Estes efluentes podem ser tratados ou não tratados. O esgoto é em geral constituído por um líquido contendo cerca de 99,9% de água e 0,1% de substâncias minerais e orgânicas em dissolução e em suspensão.

Os esgotos domésticos apresentam características físicas, químicas e bacteriológicas que são determinadas através de alguns fatores, como teor de matéria sólida, temperatura, odor, cor, turbidez, entre outros. Dentre as características físicas, o teor de matéria sólida é o mais importante para o dimensionamento e operação dos sistemas de tratamento de esgotos. A temperatura situa-se, em geral, numa faixa de 20 a 25º C, sendo sua influência importante nos processos de tratamento biológico. Os odores característicos dos esgotos são causados pelos gases formados no processo de decomposição. A cor e turbidez indicam, de imediato, o estado e a condição de decomposição do esgoto.

Com relação às suas características químicas, os esgotos podem ser classificados em dois grupos: matéria orgânica e matéria inorgânica. Cerca de 70% dos sólidos presentes nos esgotos são de origem orgânica, sendo uma combinação de compostos de proteínas (40 a 60%), carboidratos (25 a 50%), gordura e óleos (10%), uréia, surfactantes, fenóis, pesticidas, etc.

O esgoto é veículo de agentes de cólera, das febres tifóides e para-tifóides, salmonelas causadoras de gastrenterites, leptospiras, bacilo da tuberculose, enterovírus causadores da poliomelite, vírus da hepatite, etc.

De acordo com Grace (1978), efluentes de esgotos são comumente lançados em corpos d'água como rios, lagos, estuários, mares e oceanos. A diluição do efluente no corpo d'água receptor pode completar o tratamento iniciado em terra nas estações de tratamento de esgotos e a carga a ser lançada é tanto menor quanto maior for o grau de tratamento em terra. Assim, para o controle da poluição das águas, deve ser fixado em primeiro lugar o padrão de qualidade específico do corpo receptor, de acordo com seus usos benéficos e, em segundo lugar o padrão de lançamento do efluente. No primeiro caso, devem ser especificados padrões mínimos para a qualidade da água fora da zona de mistura, pois nesta zona, chamada de zona de diluição inicial, não deveria estar sujeita ao padrão de qualidade da água, e que, no entanto, fora dela o padrão não deve ser ultrapassado.

Pela legislação brasileira, entende-se que os emissários submarinos têm como principais objetivos: dispor os esgotos dos municípios litorâneos de forma a proteger a região de banho de acordo com os limites de balneabilidade da Resolução CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) n.º 274/00 (BRASIL, 2000), e minimizar os impactos do lançamento através da máxima e rápida diluição através de difusores visando o atendimento à Resolução CONAMA n.º 357/05 (BRASIL, 2005). Como os emissários submarinos têm por princípio completar o tratamento nos processos de difusão, diluição, dispersão e decaimento bacteriano das cargas poluentes e contaminantes lançados nos oceanos, após o lançamento dos esgotos, as condições deste lançamento ficam submetidas às exigências do órgão ambiental competente, o qual estabelece a carga poluidora máxima a ser lançada. Neste sentido, o órgão ambiental estabelece o nível de tratamento (pré-condicionamento, tratamento primário ou tratamento secundário), assim como procura fixar as dimensões da zona de mistura.

A Resolução CONAMA nº 274/00, define critérios para a classificação de águas destinadas à recreação de contato primário. Segundo os critérios estabelecidos por essa Resolução, as praias são classificadas em quatro categorias diferenciadas, quais sejam: Excelente, Muito Boa, Satisfatória e Imprópria, de acordo com as densidades de Coliformes Termotolerantes ou E. Coli resultantes de análises feitas em cinco amostragens consecutivas. As categorias Excelente, Muito Boa e Satisfatória podem ser agrupadas numa única classificação denominada Própria (CETESB, 2007). Na Tabela 1 são apresentados os limites de balneabilidade estabelecidos pela Resolução CONAMA n.º 274/00.

Tabela 1 – Limites de Balneabilidade conforme Resolução CONAMA n.º 274/00

Categoria	As águas consideradas próprias poderão ser subdivididas nas seguintes categorias, quando em 80 % ou mais de um conjunto de amostras obtidas em cada uma das cinco semanas anteriores, colhidas no mesmo local, houver, no máximo:
Excelente	250 Coliformes fecais ou 200 Escherichia coli ou 25 Enterococcos por 100 ml
Muito Boa	500 Coliformes fecais ou 400 Escherichia coli ou 50 Enterococcos por 100 ml
Satisfatória	1000 Coliformes fecais ou 800 Escherichia coli ou 100 Enterococcos por 100 ml

A Resolução CONAMA n.º 357/2005, em seu Capítulo IV, que dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, estabelece em seu Artigo 34 que: “os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados, direta ou indiretamente, nos corpos de água, após o devido tratamento e desde que obedeçam às condições, padrões e exigências dispostos nesta Resolução e em outras normas aplicáveis”. No entanto, a Resolução não estabelece o padrão e o grau de condicionamento em que devem estar os esgotos domésticos a serem lançados no mar através de emissários submarinos. A CONAMA n.º 357/2005 estabelece diretrizes que remetem ao órgão ambiental competente a definição para lançamentos através dos emissários. Assim, o Artigo 25 – Parágrafo Único – permite que o lançamento possa apresentar parâmetros com concentrações superiores ao estabelecido no Artigo 34, desde que com prévia autorização, critério e controle do órgão ambiental. O Artigo 33 – Parágrafo Único – da mesma Resolução autoriza que na zona de mistura (ainda a ser definida, caso a caso) os parâmetros estejam acima dos limites da Classe desde que com prévia autorização, critério e controle do órgão

ambiental. A resolução ainda define que a zona de mistura é a região do corpo receptor onde ocorre a diluição inicial de um efluente.

Dessa forma, durante o processo de licenciamento do sistema de disposição oceânica, os órgãos ambientais ratificam a concepção e estabelecem os critérios para o lançamento e para o monitoramento do efluente, determinando inclusive após o início da operação, a qualquer momento a necessidade de melhorias adicionais no tratamento caso o monitoramento indique ser necessário fazê-lo (SABESP, 2006a).

As modelagens matemáticas estão sendo amplamente utilizadas para estabelecer esta qualidade do efluente, pois antevê a qualidade das águas do corpo receptor, após o lançamento. O programa mais utilizado para esta avaliação é o sistema especialista CORMIX (“Cornell Mixing Zone Expert System”).

Ainda conforme Arasaki (2004), para a detecção / delimitação da zona de mistura as ferramentas usadas podem ser: imageamento do emissário (Ecobatímetro Multifeixe/Sidescan); detecção e visualização da pluma do efluente (modelagem volumétrica); modelagem do campo próximo; modelagem do campo distante; fotos de sobrevôos sobre as áreas dos emissários; uso de sensoriamento remoto.

3.4.2 Óleos derivados do petróleo e água de lastro dos navios

Outro efluente possível, o óleo proveniente de vazamento no mar de navios ou por dutos é uma mistura complexa que envolve uma grande quantidade de substâncias químicas. Os óleos derivados do petróleo apresentam diferentes variedades de hidrocarbonetos e podem ser classificados como não persistentes, que tendem a desaparecer rapidamente da superfície do mar (gasolina, nafta, querosene, óleos leves), e persistentes (óleos crus).

O petróleo apresenta, quimicamente, milhares de compostos diferentes que formam uma mistura muito complexa. Os hidrocarbonetos são os principais componentes do petróleo e chegam a atingir 98% da composição total (CLARK E BROWN 1970, apud CETESB, 2006). Enxofre, nitrogênio e oxigênio são constituintes menores, no entanto, importantes. Devido à predominância de

hidrocarbonetos no petróleo, são esses os compostos utilizados como indicadores deste tipo de poluição (CETESB, 2006).

Vários fatores contribuem para o espalhamento de uma camada de óleo sobre a superfície da água, dependendo da natureza do produto, das quantidades derramadas e das condições meteorológicas predominantes (correntes de superfície, vento e temperatura da água) (ALFREDINI, 2005).

A água de lastro dos navios pode conter mariscos, algas, peixes e pequenos invertebrados, além de ovos, cistos e larvas de diversas espécies que provem de diferentes ecossistemas. Uma pequena parcela pode sobreviver e, se não encontra predadores naturais, passa a se reproduzir descontroladamente e causar desequilíbrio para a fauna e flora locais. A água de lastro pode conter ainda vírus e bactérias que causam doenças principalmente nas populações ribeirinhas.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Considerações Gerais

Neste capítulo são apresentados alguns conceitos de modelagem matemática. Cabe lembrar, que na apresentação dos conceitos de modelagem, tanto hidrodinâmica quanto de dispersão da pluma, foram citados alguns exemplos de modelos utilizados, no entanto não se teve a intenção de esgotar o assunto e tampouco citar todos os modelos existentes. Muitos modelos têm sido desenvolvidos devido à importância da modelagem matemática nos estudos de impacto de soluções de engenharia, tanto na gestão de recursos hídricos como de regiões costeiras e estuarinas.

No litoral da Baixada Santista, de modo geral, a circulação marítima hidrodinâmica é pouco conhecida, assim como as correntes associadas aos fatores meteorológicos. Podem ser citados trabalhos de monitoramento efetuados por empresas como CODESP, PETROBRAS, CETESB e SABESP. Diversos estudos acadêmicos, desenvolvidos na Universidade de São Paulo, também foram, e são, desenvolvidos no intuito de aprofundar os conhecimentos nesta região. A maioria destes estudos concentra-se na Baía e Estuário de Santos e procuram avaliar o impacto do lançamento de esgotos domésticos em águas costeiras.

No intuito de fazer uma revisão bibliográfica abrangente, procurou-se apresentar uma coletânea de trabalhos anteriores que tratassem de modelagem matemática na região de estudo, assim como trabalhos de coleta de dados hidrográficos. No levantamento bibliográfico procurou-se abranger estudos envolvendo a modelagem matemática aplicada às situações de interesse. Destes estudos foram obtidas diretrizes para a metodologia desta Tese.

4.2 Modelagem Matemática da Hidrodinâmica

A utilização de modelos computacionais como ferramenta para simulações do padrão de circulação hidrodinâmica e de qualidade da água tem importância fundamental nos estudos engenharia costeira, principalmente no que diz respeito aos estudos ambientais.

Os modelos matemáticos, em permanente estado de evolução, associados à ferramenta computacional, e às técnicas de programação adequadas à otimização da busca de soluções para problemas complexos, viabilizam estes estudos com elevado número de variáveis (COSTA, 2002).

Os modelos matemáticos representam os fenômenos da natureza através de equações diferenciais e permitem obter o padrão de circulação dos corpos d'água, definido pelas correntes e a elevação da superfície ao longo do domínio modelado, em função da condição da batimetria e forçantes. No entanto, esta não é uma tarefa simples devido a complexidades dos processos envolvidos.

A utilização de métodos numéricos deve-se ao fato de não se conhecer a solução analítica das equações envolvidas no processo, geralmente equações diferenciais não homogêneas. Com o avanço na área de informática, houve um progresso significativo na utilização de métodos numéricos, tornando os modelos matemáticos mais complexos e abrangentes.

Conforme Harari (1989), a modelagem numérica permite não apenas resolver as equações que descrevem os fenômenos físicos, mas também constitui uma ferramenta para experimentos relativos aos processos que interagem e compõem as características observadas nos oceanos.

A aplicação de modelos hidrodinâmicos 2D e 3D para estudo de impactos de soluções de engenharia tem como empecilhos a dificuldade para inicialização (configurações iniciais), o tempo de processamento, a quantidade de processos a serem implementados, além da dificuldade de calibração. Sendo que, um dos principais problemas é a especificação de adequadas condições de contorno nas bordas abertas.

No caso da modelagem tri-dimensional, seu uso é de particular interesse nos problemas de transporte onde o campo de fluxo horizontal mostra significante

variação na direção vertical. Esta variação pode ser gerada por forçantes de vento, resistência do fundo, força de Coriolis, topografia do fundo ou diferenças de densidade.

4.2.1 Métodos de resolução numérica dos modelos matemáticos

A resolução numérica de um modelo matemático consiste no processo de discretização, que reduz os problemas físicos, contínuos, a um problema discreto com um número finito de incógnitas.

A discretização é o método de aproximação das equações diferenciais por um conjunto de equações algébricas que contêm variáveis do sistema em uma localização discreta no espaço e no tempo. As localizações discretas são referidas como malha ou “grid” (grade) do sistema.

Os métodos numéricos mais utilizados na resolução dos modelos matemáticos da dinâmica dos fluidos são os das diferenças finitas, volumes finitos e elementos finitos.

Os métodos numéricos tendem a simplificar e reduzir a complexidade dos problemas reais de engenharia, física, oceanografia, meteorologia, etc. Conforme Harari (1989) as simplificações normalmente consideradas na análise de um problema recaem em duas categorias: as simplificações matemáticas e as simplificações físicas. O método de diferenças finitas e a aproximação de mínimos quadrados representam o grupo de simplificações matemáticas utilizadas para reduzir a complexidade das equações. Enquanto que, o método dos elementos finitos é um exemplo de uma simplificação física.

Conforme Wrobel (1989) no método das diferenças finitas, a região de interesse é representada por uma série de pontos ou nós, e a relação entre os valores nestes pontos são geralmente obtidas através de expansão truncada em série Taylor. No método dos elementos finitos, a relação entre os valores nodais é obtida por meio de polinômios de interpolação, válidos para cada sub-região ou elemento.

Conforme Bleninger (2006), atualmente, existem mais de 20 modelos de circulação, sendo que a maioria deles usados para estudos oceanográficos (modelos oceânicos). Com poucas exceções, eles são modelos de diferenças finitas.

Os modelos mais citados são: MIKE 3 (Danish Hydraulics Institute), POM (Princeton Ocean Model – Princeton University), ECOM-si (modificado do POM usado pela Hydroqual), Delft3D (Delft Hydraulics), Telemac 3D (da EDF, Electricité de France e Wallingford) e SisBAHIA® (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental da Universidade Federal do Rio de Janeiro UFRJ).

O Modelo Hidrodinâmico do SisBAHIA® tem discretização espacial via elementos finitos e adota diferenças finitas na discretização temporal (SISBAHIA, 2008).

A seguir são descritos, de maneira sucinta, características destes métodos. Nesta Tese estão sendo utilizados três modelos hidrodinâmicos com resolução numérica por diferenças finitas.

4.2.1.1 Método das Diferenças Finitas

O método das diferenças finitas é o mais antigo e mais fácil para a resolução numérica de equações diferenciais parciais, para geometrias simples.

A idéia básica do método é a aproximação das derivadas parciais de uma equação diferencial através de equações algébricas por uma solução discreta em determinados pontos do domínio. O domínio de cálculo deve ser dividido usando-se uma malha, onde as linhas da malha servem como linhas de coordenadas locais.

Assim, a discretização das equações é obtida “termo a termo” por aplicação direta de operadores de diferenças finitas nas derivadas que os compõem. Ou seja, as derivadas das equações diferenciais são substituídas por aproximações a diferenças finitas, num conjunto discreto de pontos – no espaço e no tempo.

A Série de Taylor pode ser utilizada para estabelecer as aproximações das derivadas por diferenças finitas. Desta maneira é possível estimar o erro cometido em cada tipo de aproximação.

De forma aproximada, pode-se tomar uma função $f(x)$ com incremento pequeno de intervalo de grade $\Delta x > 0$ e utilizar a Série de Taylor para estabelecer as aproximações:

$$f(x+\Delta x) = f(x) + f'(x)\Delta x + f''(x)\left(\frac{\Delta x^2}{2}\right) + f'''(x)\left(\frac{\Delta x^3}{3}\right) + \ldots, \quad (1)$$

Portanto:

$$f'(x) = \frac{f(x+\Delta x) - f(x)}{\Delta x} + R, \quad (2)$$

Onde R é o resíduo, no qual o termo de maior ordem é $f''(x)\frac{\Delta x^2}{2}$. Quando R é desprezado, a aproximação de f'(x) é chamada de diferença avançada e neste caso tem-se a "diferença avançada" de ordem Δx. O erro de truncamento da aproximação de diferenças finitas é dado como $\theta(\Delta x)$. Portanto, a menor potência de Δx que aparece no erro de truncamento é chamada ordem de precisão da diferença finita.

A aproximação da chamada "diferença centrada" tem erro de truncamento da ordem de $\theta(\Delta x^2)$, e é dada por:

$$f'(x) = \frac{f(x+\Delta x) - f(x-\Delta x)}{2\Delta x} + R, \quad (3)$$

Na "diferença centrada" o resíduo R não é o mesmo da diferença avançada.

Para obter aproximações de diferenças para derivadas de ordem superior, podem ser empregadas séries de Taylor, ou através da aplicação de repetidas aproximações, por exemplo:

$$f''(x) = \frac{f(x+\Delta x) - 2f(x) + f(x-\Delta x)}{\Delta x^2} + \theta(\Delta x^2), \quad (4)$$

que é a aproximação de diferença centrada para a derivada de segunda ordem, com erro $\theta(\Delta x^2)$.

Segundo Wrobel (1989), para um certo esquema numérico de aproximação ser confiável é necessário que apresente propriedades de consistência, convergência e estabilidade. Consistência está relacionada com a aproximação do sistema contínuo de equações por um sistema discreto. Um esquema de diferenças finitas é dito consistente quando, ao refinarem-se as aproximações por diferenças finitas, no limite as mesmas se tornem matematicamente equivalentes às equações originais. Isto significa que, quando os incrementos espacial e temporal tendem a zero, o erro de truncamento obtido na expansão da solução aproximada por série de Taylor também tende a zero. Convergência é a condição na qual a solução do esquema aproximado tende para a solução exata da equação diferencial, à medida que se diminuem os incrementos espacial e temporal. A estabilidade é uma propriedade relacionada, basicamente, com o esquema de integração no tempo. Quando um método numérico é instável, uma pequena perturbação, tal como um erro de truncamento tende a crescer na medida em que o processo de cálculo avança no tempo. Na maioria das vezes, essa amplificação é de ordem exponencial e o erro cresce acima de limites razoáveis após um pequeno número de passos de tempo no processo computacional.

4.2.1.2 Método dos Volumes Finitos

O método dos volumes finitos usa a forma integral das equações de conservação, sendo que o domínio de cálculo é dividido em um número finito de volumes de controle contínuos, e as equações de conservação são aplicadas para cada volume de controle. No centro de cada volume de controle existe um nó computacional no qual os valores da variável têm que ser calculados. A interpolação é usada para expressar os valores das variáveis na superfície do volume de controle em termo dos valores nodais, resultando assim equações algébricas para cada volume de controle.

A solução numérica de equações diferenciais, para o Método dos Volumes Finitos é acompanhada da discretização do volume, em células bidimensionais

(triangular ou quadrilateral) ou tridimensionais (tetraédrica, hexaédrica, prismática, piramidal) (FORTIS, 2005).

Conforme Soto (2004), a desvantagem do método de volumes finitos é que as equações são mais difíceis de desenvolver em 3D se comparados com o método de diferenças finitas. Isto é devido ao fato de que as aproximações do método de volumes finitos requererem dois níveis de aproximação: interpolação e integração.

4.2.1.3 Método dos Elementos Finitos

No método dos elementos finitos as equações são mantidas, mas a complexidade é reduzida através da substituição da área (ou volume) modelada por um número finito de pedaços discretos, chamados elementos. Estes elementos são interligados em pontos chamando nodos, assim o comportamento dos elementos constitui uma aproximação da área contínua em estudo (HARARI, 1989).

Uma importante vantagem do método é a habilidade de trabalhar com geometrias arbitrárias. O grau de refinamento da grade de elementos finitos é função do nível de detalhes requerido nos resultados da solução. Os elementos interagem entre si somente através dos nodos. As múltiplas interações entre os nodos são representadas matematicamente por um sistema de equações simultâneas. Esse sistema pode ser representado na forma matricial.

Os modelos numéricos de elementos finitos podem ser verticalmente integrados para representar a circulação bidimensional ou integrados verticalmente por camadas para a circulação tridimensional. A principal vantagem dos elementos finitos é a flexibilidade na escolha dos elementos e nodos, possibilitando refinamentos em regiões de interesse com mais facilidade.

4.3 Modelagem Matemática da Dispersão da Pluma

Nos estudos realizados para a avaliação do impacto do lançamento de esgotos domésticos em águas costeiras e nas tomadas de decisão relativas ao ponto de lançamento ideal, a modelagem de plumas de efluentes lançados por emissários submarinos de esgotos tem-se tornado de grande relevância.

De acordo com Roberts (1979), o processo dispersivo do efluente lançado ao mar através de emissário submarino possui três fases distintas, a saber: Fase 1 - de diluição inicial, onde as forças de empuxo, quantidade de movimento do efluente e os efeitos dinâmicos das correntes locais, que resultam em uma rápida mistura e diluição do efluente no corpo d'água receptor; Fase 2 - representada pelo espalhamento dinâmico horizontal e o colapso vertical da pluma após alcançar sua altura terminal; Fase 3 - que consiste na difusão turbulenta passiva e na advecção produzidas pelas correntes oceânicas na região de estudo.

Assim, a dispersão da pluma se dá em duas regiões com características de escalas temporal e espacial marcadamente distintas, são elas: o campo próximo, dominado pela turbulência gerada pelos jatos efluentes da tubulação difusora, forças de empuxo, escoamento ambiente e perfis de densidade (Fase 1 e 2); e o campo afastado, onde predominam a turbulência gerada pelas hidrodinâmica local (Fase 3). Devido às diferenças de escoamento entre estas zonas de mistura ativa (campo próximo) e de mistura passiva (campo afastado) são adotadas metodologias de modelagem específicas para cada zona.

No entanto, de acordo com Bleninger (2006), nos emissários submarinos a dispersão do esgoto pode ser conceituada para ocorrer em três regiões hidrodinâmicas, conforme o processo de mistura dominante. O campo próximo é dominado por uma fonte de mistura turbulenta induzida em forma de jatos efluentes. O campo intermediário é caracterizado por baixa mistura, mas forte espalhamento devido à interação das bordas e os processos de espalhamento flutuante. A região do campo afastado é dominada pelo fluxo do ambiente, onde a advecção induz o campo de esgoto ser transportado e a difusão ambiente promove o espalhamento do campo de esgoto.

Quando o efluente é lançado em forma de jato submerso através dos difusores de um emissário submarino, uma força de empuxo proporcional à diferença entre a densidade do efluente e a densidade do corpo receptor, faz com o fluxo se eleve à superfície. Neste processo de elevação do jato em direção à superfície, o mesmo mistura-se com a água e tanto a quantidade de movimento (força de lançamento) quanto o empuxo decrescem, enquanto que a energia cinética e a energia potencial são transformadas pelas forças tangenciais (advecção). Este processo é chamando de diluição inicial e ocorre no campo próximo. Quando o jato atinge o nível de equilíbrio hidrostático na superfície, ou abaixo desta (em função da estratificação do meio), a mistura sofre uma transição entre o fluxo vertical e o espalhamento horizontal. Nesta fase inicia-se a transição entre o campo próximo e o campo afastado.

Segundo Feitosa e Rosman (2007), as diferentes escalas espaciais e temporais envolvidas no processo de mistura do efluente sanitário em águas marinhas dificultam a concepção de um único modelo na avaliação do impacto provocado pelo lançamento deste efluente no meio.

O limite do campo próximo é definido como o ponto onde a diluição passa a não variar significativamente com a distância em relação à tubulação difusora. Neste ponto há uma súbita diminuição da turbulência, devido à influência de um processo de estratificação estável que ocorre ao longo da seção da pluma (FEITOSA e ROSMAN, 2007).

Conforme a pluma afasta-se do ponto de lançamento, diminui a influência da configuração geométrica do difusor no processo da mistura. Inicia-se a fase na qual a advecção e a turbulência do ambiente irão controlar a trajetória e a taxa de diluição da pluma, o chamando campo afastado.

O processo advectivo caracteriza-se pela variação local da concentração das substâncias através do transporte de massa, realizado pela circulação das águas (campo de velocidade). Os processos difusivos caracterizam-se pela variação local de concentração das substâncias produzida pela turbulência da água. A equação do transporte advectivo e difusivo é dada por:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u\frac{\partial C}{\partial x} + v\frac{\partial C}{\partial y} + w\frac{\partial C}{\partial z} = D\nabla^2 C \qquad (5)$$

Onde u, v e w são as componentes da velocidade média nas direções x, y e z, respectivamente, e o D que é o coeficiente de difusão. Esta equação representa a variação local efetiva da concentração (C) devida aos efeitos conjuntos da difusão e da advecção para um fluido incompressível. Nesta equação são desprezados os efeitos devido às reações químicas e biológicas, e às variações de densidade.

Atualmente são conhecidos diversos modelos que simulam o comportamento da pluma ao longo de sua trajetória no corpo d'água receptor. De maneira geral e dependendo das características do modelo, as modelagens informam a concentração dos poluentes conservativos (não mudam devido a reações químicas e biológicas internas) e não conservativos (podem ser modificados por processos químicos e biológicos internos), e descrevem a geometria da pluma em campo próximo e em campo afastado.

Alguns modelos que embora sejam softwares com ênfase no campo próximo, trazem acoplados módulos de campo distante, possibilitando uma análise completa da trajetória da pluma. Outros softwares foram desenvolvidos especificamente para análise da dispersão da pluma (fase secundária), em geral vinculados a softwares com módulo hidrodinâmico, possibilitando uma análise mais apurada da pluma no campo afastado.

4.3.1 Modelagem de Campo Próximo

A seguir é apresentada uma descrição sucinta de alguns dos modelos mais utilizados em campo próximo.

O Visual Plumes disponibilizado pela Agência de Proteção Ambiental Norte Americana (USEPA – United States Environmental Protection Agency) possui em sua interface os modelos UM3, UDKHG e DKHW, e o RSB. O UM3 é um modelo lagrangeano de arrasto tridimensional que apresenta um sistema de coordenadas que se move com a pluma e a integração é feita no tempo. O programa simula a descarga de emissários com saída única e com difusores. Os modelos UDKHG e DKHW utilizam o método de integral Euleriano para resolver as equações de movimento da trajetória da pluma bem como de concentração e tamanho. Ao

contrário do método Lagrangeano (onde a variável independente é o tempo), a distância é a variável independente. O RSB (Roberts, Snyder and Baumgartner), chamado atualmente de NR-FIELD, utiliza formulações semi-empíricas baseadas em experimentos para ambientes homogêneos e estratificados, respectivamente.

O modelo computacional CORMIX (“Cornell Mixing Zone Expert System”) é um sistema especialista de análise e prognóstico do lançamento e dispersão de efluentes domésticos e industriais em diversos tipos de corpos d’água, permitindo a verificação do atendimento dos parâmetros de qualidade à legislação vigente. Baseia-se na técnica do método integral em que equações derivadas parciais são transformadas em equações diferenciais ordinárias e integradas na seção, a partir do conceito de solução de similaridade aplicado a jatos e plumas turbulentas e admitindo-se distribuição gaussiana de velocidade, temperatura e concentração (POPE, 2000 apud ORTIZ et al, 2007). Apresenta uma gama grande de configurações geométricas de difusores.

Conforme Feitosa e Rosman (2007) os modelos NRFIELD e UM3 permitem a inserção de um perfil qualquer de densidade nas simulações. No modelo CORMIX, o usuário tem quatro possibilidades de escolha do perfil de densidade: uniforme; linear; duas camadas; e duas camadas com densidade da camada inferior variando linearmente.

O Software FLUENT é baseado na Dinâmica dos Fluidos Computacional – DFC (Computational Fluid Dynamics – CFD), que consiste na utilização de métodos numéricos para transformar as equações de derivadas parciais, que dirigem o escoamento (continuidade, quantidade de movimento, energia, transporte de espécies), em equações algébricas, aplicando-se técnicas computacionais, destacando-se a técnica de volumes finitos (VERSTEEG e MALALASEKERA, 1995 apud ORTIZ et al. 2007).

O programa FLUENT permite modelar a mistura e o transporte de substâncias químicas resolvendo a equação geral de conservação que descreve, simultaneamente, os fenômenos de convecção, difusão e reação química. A modelagem de transporte de substâncias químicas pode ser realizada, considerando ou não as reações químicas entre as substâncias. Com o programa FLUENT é possível avaliar, além do campo próximo, também o campo afastado.

4.3.2 Modelagem de Campo Afastado

No campo afastado, a pluma é transportada passivamente pelas correntes oceânicas. Nesta zona de mistura passiva, a distribuição das concentrações de um dado contaminante existente na pluma dependerá principalmente dos seguintes processos:

- advecção promovida pelas correntes oceânicas responsáveis pelo transporte do contaminate em questão. Assim, a modelagem do transporte da pluma depende da qualidade do modelo hidrodinâmico que gera o campo de correntes que advecta a pluma;
- difusão turbulenta do contaminante. Esta turbulência ambiente é gerada por tensões de atritos internos na massa de água, tensões de atrito do fluido com o fundo e atrito do vento na superfície livre. Neste caso, a difusão também depende da qualidade do modelo hidrodinânico, ou seja do modelo de turbulência adotado.
- Reações cinéticas de produção ou decaimento do contaminante no meio receptor (modelos de decaimento).

A posição na qual o efluente se estabiliza ao longo da coluna de água não varia significativamente do campo próximo para o campo afastado. Na modelagem é importante levar em consideração as variações que ocorrem na espessura da pluma na transição do campo próximo para o campo afastado. Para esta zona de transição entre o campo próximo e o campo afastado, chamado de campo intermediário, autores como Bleninger (2006) e Feitosa e Rosman (2007) sugerem o acoplamento entre os modelos de campo próximo e campo afastado.

Alguns modelos que simulam o campo afastado são descritos a seguir:

Gordon (2000) e Harari e Gordon (2001) apresentam três soluções numéricas, todas utilizando campos de correntes gerados pelo POM, a saber: MAPOM que é um modelo de dispersão acoplado ao POM, que resolve a equação da advecção-difusão-decaimento em coordenadas verticais σ, através de método diferenças

finitas e utiliza MODIF que é similar à primeira solução, mas em coordenadas verticais lineares; e MOCAD modelo de dispersão que representa a advecção com a formulação Lagrangeana e a difusão / decaimento através da técnica da caminhada aleatória.

Um dos módulos do Delft3D, o Delft3D-WAQ é um modelo tri-dimensional de qualidade da água, que resolve equações de advecção-difusão-reação sobre uma grade computacional predefinida e para uma série ampla de substâncias. O Delft3D-WAQ não é um modelo hidrodinâmico, uma vez que as informações do campo de fluxo são derivadas do Delft3D-FLOW que é o módulo hidrodinâmico do Delft3D. O módulo Delft3D-FLOW está descrito no Capítulo 5 desta Tese.

A série de substâncias que podem ser avaliadas como Delft3D-WAQ são: substâncias conservativas, substâncias com decaimento, sólidos suspensos, temperatura, nutrientes, oxigênio dissolvido, DBO e DQO, algas, bactérias, metal pesado, micro poluentes orgânicos. Permite também especificar uma série de processos físicos, bioquímicos e biológicos, como: sedimentação e ressupensão, reaeração de oxigênio, crescimento e mortalidade de algas, mineralização de substâncias orgânicas, nitrificação e denitrificação, adsorção de metal pesado e volatização de micro poluentes orgânicos.

Feitosa e Rosmam (2007) utilizam um modelo de transporte lagrangeano determinístico para simulação em campo afastado contido no SisBAHIA®. É um modelo de uso geral para simulação de transporte advectivo-difusivo com reações cinéticas, para camadas selecionadas de escoamentos 3D ou 2D. Este modelo é especialmente adequado para simulações de vários tipos de problemas, por exemplo plumas de emissários ou pontos de lançamento de efluentes ao longo da costa. Permite a simulação de plumas de esgoto com vazões variáveis e taxas de decaimento (T90) variáveis de acordo com época do ano, horas do dia, condições de cobertura de nuvens, etc (SISBAHIA, 2008).

4.4 Estudos anteriores

Neste item é apresentada, de forma resumida, uma coletânea de trabalhos anteriores que abordam modelagem matemática na região de estudo, trabalhos de coleta de dados de medição de campo e trabalhos de modelagem matemática de interesse para o estudo em tela.

Em ordem cronológica (dos mais recentes para os mais antigos), e não de relevância, os trabalhos são apresentados divididos por itens. Na Figura 5 está a localização dos pontos de medição referente aos trabalhos de coleta de dados da região de estudo, e na Figura 7, de forma esquemática, estão localizados os contornos das grades batimétricas utilizadas nos trabalhos apresentados nesta coletânea.

4.4.1 Trabalhos de modelagem matemática que incluem a Baixada Santista

Num dos trabalhos mais recentes de modelagem de uma região que inclui a Baixada Santista, **Picarelli (2006)** implementou o Princeton Ocean Model (POM) para a região costeira Centro-Sul do Estado de São Paulo. A região denominada Centro–sul abrange os municípios de Praia Grande, Mongaguá, Itanhaém, Peruíbe, Iguape e Cananéia. Foram utilizados espaçamento de grade de 1 km (grade principal) e 200 m (grades aninhadas). As forçantes utilizadas foram: maré, ventos (remotos e locais) e campo de densidade (distribuição de temperatura, salinidade e descarga fluvial no sistema). No trabalho de Picarelli (2006) foi dada continuidade aos estudos realizados por Picarelli (2001). No primeiro trabalho a autora havia considerado apenas a circulação devida à maré astronômica.

Em Picarelli (2006) foram obtidos mapas com a distribuição da elevação do nível do mar, correntes na superfície, correntes médias na vertical, correntes em profundidades selecionadas e valores de temperatura e salinidade em níveis de interesse e médias mensais da elevação do nível do mar e correntes de superfície. Os processamentos foram realizados considerando as componentes de circulação já citadas e em condições de inverno e verão e situações de entradas de frentes frias na plataforma sudeste brasileira.

Em suas conclusões, a autora afirma que o trabalho demonstrou que o movimento devido à maré é preponderante na região de estudo, tanto em águas mais profundas, como junto à costa. A autora afirma, também, que a circulação devida aos ventos é a segunda mais importante. Nota-se nos mapas instantâneos dos padrões de circulação na superfície um aumento significativo na intensidade das correntes quando se introduz a forçante vento nas simulações.

Em outro recente trabalho de modelagem, em **SABESP (2006)** foi implementada modelagem computacional para a determinação dos padrões de circulação e transporte na região oceânica adjacente à Baía de Santos e Praia Grande – SP.

O campo de velocidades, associado à hidrodinâmica da região de estudo, foi obtido através da implementação de dois modelos, em meso-escala e escala local, ambos baseados no Princeton Ocean Model (POM), e adaptados pela equipe de modelagem da ASA South America. A grade de meso-escala possui dimensão horizontal máxima de 300 x 190 pontos e 13 níveis na vertical, com espaçamento horizontal de aproximadamente 1 km. A grade utilizada no modelo local (pequena escala) foi definida com 200 x 300 pontos, com espaçamento horizontal de 100 metros na região de maior resolução. Foram usadas como forçantes a maré, o vento, a estrutura termohalina média, a descarga fluvial, e forçantes remotas climatológicas nas bordas abertas. No processo de implantação do modelo de menor escala (e maior resolução), as condições termohalinas e de borda (elevação e corrente, datados) foram substituídas pelos resultados provenientes da simulação de mesoescala.

O processo de calibração e, subseqüente validação, do modelo hidrodinâmico desenvolveu-se através da comparação entre os resultados do modelo e os dados de correntes medidos em campo. Os coeficientes de correlação lineares médios calculados foram de 89% para a elevação da superfície e de 68, 65 e 60%, para as correntes nas profundidades de 1, 5 e 10 metros, respectivamente.

A análise dos dados coletados e os resultados da modelagem mostram que o modelo hidrodinâmico de escala local reproduziu as variabilidades mais energéticas observadas na região, associadas à incidência sistemas frontais, aos sistemas de brisa e, em regiões interiores (Estuário de Santos), à maré astronômica. Os

resultados obtidos para o padrão de circulação e transporte foram utilizados na modelagem da pluma dos emissários, em etapa posterior do trabalho.

Também em SABESP (2006) foi efetuado o estudo de modelagem computacional para a determinação da caracterização dos padrões de dispersão das plumas de quatro emissários submarinos localizados na Baía de Santos e na região costeira da Praia Grande, que são: Emissário de Santos/São Vicente, Emissários Praia Grande 1, Praia Grande 2 e Praia Grande 3 ainda em projeto, com início de operação previsto para 2010.

Os processos biogeoquímicos de dispersão e decaimento das plumas dos efluentes lançados pelos emissários (modelagem do campo afastado) foram obtidos através da utilização do sistema de modelos WQMAP desenvolvido pela Applied Science Associates (ASA) Inc. Os resultados mostraram que para as simulações realizadas nos períodos de inverno e verão, sob diferentes condições de regime de corrente, maré, e de vento não ocorre sobreposição das plumas.

Os resultados mostraram, também, que a extensão e as concentrações da pluma proveniente do Emissário de Santos apresentam valores superiores às das plumas dos emissários da Praia Grande. Este padrão pode estar associado à maior carga de efluente neste emissário, e à dinâmica da circulação hidrodinâmica no interior da Baía de Santos.

Em **Baptistelli (2003)** foi caracterizada a hidrodinâmica das águas do litoral da Praia Grande, a partir da compilação e análise dos dados de correntes existentes e da aplicação de modelagem computacional (modelo computacional MIKE 21), a fim de fornecer subsídio a estudos de dispersão de efluentes, no que tange ao campo afastado.

Foi utilizado o modelo hidrodinâmico do MIKE 21, desenvolvido pela DHI – DANISH HYDRAULIC INSTITUTE WATER & ENVIRONMENT, que é um sistema de modelagem numérica para simulação das variações do nível e fluxo d’água em estuários, baías e áreas costeiras em geral. O modelo simula fluxos variáveis em duas dimensões em um nível verticalmente homogêneo.

Foi utilizada uma grade batimétrica de 200 x 120 pontos e espaçamento horizontal de 300 m. Foram utilizadas as forçantes de maré (variação temporal e espacial) e vento (variação temporal).

Para as condições de contorno das bordas abertas foi especificada a variação temporal e espacial do nível d'água através da variação da maré conforme previsão efetuada pelo MIKE 21, utilizando os valores de fase e amplitude das 9 principais constituintes de maré. Os dados de vento utilizados na modelagem foram obtidos junto à Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil – DHN, a partir do Banco Nacional de Dados Oceanográficos – BNDO.

A partir dos resultados das simulações foi efetuada uma previsão de correntes de projeto para um futuro emissário submarino na praia de Mongaguá. O processo de calibração e validação do modelo hidrodinâmico foi fundamental para dar confiabilidade aos resultados dessas previsões.

Numa análise geral da base de dados, conclui-se que a direção preferencial das correntes, na região da Praia Grande, foi paralela à costa, considerando-se uma faixa que varia de 3 a 15 km de distância da linha de costa. Concluiu-se que a forçante do vento apresenta uma influência relevante na circulação hidrodinâmica na área de estudo.

O local analisado para o possível ponto de lançamento do Emissário Submarino de Mongaguá foi considerado favorável, no aspecto da hidrodinâmica local, para receber os efluentes domésticos do município de Mongaguá. Determinou-se que as direções preferenciais das correntes são paralelas à linha da costa com as maiores velocidades, de 91 cm/s, com direção entre SW-WSW e 73 cm/s, com direção entre NE-E. A velocidade máxima convergente à praia prevista foi de 44 cm/s.

Em **CODESP (2002)** foram elaborados estudos de modelagem que incluíram: i) modelo hidrodinâmico tridimensional; ii) modelo de transporte lagrangeano para o estudo da movimentação dos sedimentos. Para o estudo das ondas foi aplicado um modelo que permitiu estudar a propagação das ondas e os índices de agitação nas zonas onde estiverem os sedimentos.

Para as modelagens foi utilizado o sistema MOHID, que incluiu os modelos bidimensionais inicialmente e, posteriormente, o modelo tridimensional para a

hidrodinâmica, e ainda modelos tridimensionais de transporte lagrangeano e euleriano.

A calibração dos níveis de maré foi efetuada na sua maior parte com base nas medições realizadas nos estudos de SONDOTÉCNICA, 1977. Nas modelagens utilizando o Modelo Hidrodinâmico Tridimensional - MOHID-3D foram utilizadas duas batimetrias, uma para o modelo geral, com espaçamento de 500 a 4.000 metros e um total de 20.664 pontos, e outra malha, para o modelo local de Santos, teve espaçamento de 450 metros perto das fronteiras e 100 metros no interior da baía, com um total de 48.755 pontos de cálculo. A malha do modelo geral teve fronteiras extensas, com limites entre Cananéia (litoral sul) e São Sebastião (litoral norte). O modelo geral foi forçado impondo uma onda de maré na fronteira determinada a partir do modelo global de maré FES95.2 (LE PROVOST et al., 1998, apud CODESP, 2002). O passo de tempo utilizado foi de 100 segundos para o modelo geral e de 20 segundos para o local. No modelo geral foram utilizadas condições de fronteiras com um misto entre condições tipo radiativas e de condição de nível imposto, de forma que se definem períodos de tempo em que se impõe o nível na fronteira e, dentro destes intervalos de tempo, a fronteira funciona como sendo radiativa. No caso do modelo local este problema não ocorre, uma vez que as condições de fronteira são retiradas dos resultados gerados pelo modelo geral. A discretização vertical teve uma geometria com três domínios, com um total de seis camadas.

Noutro trabalho, **Gordon (2000)** apresentou a estimativa de evolução da dispersão de efluentes ao longo do porto e da Baía de Santos, considerando diversos cenários hidrodinâmicos e três soluções numéricas, todas utilizando campos de correntes gerados por modelo hidrodinâmico tridimensional de alta resolução para a área de 46^{o}17'W e 46^{o}23'W e de 23^{o}52'S e 24^{o}01'S, com espaçamentos horizontais de 75 m, numa grade retangular de 148 x 218 pontos, e considerados 11 níveis na vertical. Foram escolhidas oito áreas e a região do emissário submarino de esgotos sanitários como pontos de descarga de efluentes. Foram simuladas as dispersões de substâncias sob efeito combinado de maré e correntes permanentes de enchente e vazante, geradas por ventos de sudoeste e nordeste, respectivamente.

Foram implementadas três soluções para o problema da modelagem matemática da dispersão, baseadas em diferenças finitas com coordenada vertical sigma (MAPOM), em diferenças finitas com coordenada vertical linear (MODIF) e com cálculo lagrangeano para a advecção e o método do caminho aleatório para a difusão (MOCAD). Foi utilizado um esquema de processar preliminarmente o modelo hidrodinâmico POM para gerar os arquivos das correntes (e eventualmente a solução MAPOM), seguido de processamentos intensivos das soluções MODIF e MOCAD.

Foi considerado para simulações o período de 7 a 9 de fevereiro de 1997 (sizígia). Foram efetuadas simulações hidrodinâmicas de maré e também dois processamentos considerando ventos intensos. O primeiro processamento com vento reproduziu efeitos de frentes fria com ventos de SW de 50 km/h na Baía de Santos, e que por efeitos orográficos passa a SE no canal do Porto. O segundo reproduziu um efeito máximo do centro de Alta Pressão do Atlântico Sul, com ventos de NE de 50 km/h na baía (passando a ser NW no canal do Porto).

Os resultados obtidos demonstraram a eficiência computacional da metodologia utilizada e uma razoável concordância das três soluções implementadas. Os efeitos das marés astronômicas periódicas na dispersão de poluentes são muito limitados em termos de extensão espacial, mesmo em locais com intensas correntes de sizígia, enquanto que a sobreposição de correntes permanentes de enchente e vazantes, associadas a efeitos meteorológicos extremos, tende a espalhar intensamente os poluentes lançados. Outra conclusão foi a de que, na ausência de eventos meteorológicos significativos, substâncias provenientes do emissário submarino impactam uma área bastante reduzida, especialmente considerando-se o decaimento das mesmas.

Em **Harari e Camargo (1998)** foi implementado o POM para região costeira da Baixada Santista (46º - 47ºW; 23º40’ – 24º30’S). O objetivo científico principal do estudo foi o de obter um maior conhecimento da propagação das ondas de maré e da distribuição espacial das elevações e das correntes de maré na região.

Para a área estudada foi implementado o modelo POM, adotando uma grade regular cartesiana com espaçamento horizontal de 1.000 m e na vertical foram considerados 11 níveis sigma. O modelo foi utilizado exclusivamente em simulações

de maré, para componentes isoladas e para a maré astronômica completa, a partir da especificação das correspondentes oscilações nos contornos. Estas últimas foram calculadas com base nas constantes harmônicas extraídas dos mapas cotidais fornecidos pelo modelo de plataforma de Harari & Camargo (1994).

Neste estudo é discutido que o comportamento da maré numa área costeira é muito influenciado pelas marés ao largo, e que, além disso, em pequena escala gradientes do potencial de maré são desprezíveis. Para a hidrodinâmica costeira, nos modelos matemáticos, as forçantes de maré são definidas exclusivamente pelas oscilações de maré nos contornos abertos. No entanto, foi adotada uma solução onde se especificou as variações do nível do mar nas bordas e também nos pontos internos imediatamente vizinhos. Neste caso, as correntes calculadas pelo modelo nas primeiras linhas e colunas internas da grade são também válidas para as bordas abertas.

Os resultados das simulações utilizando a composição de nove componentes da maré (M_2, S_2, N_2, K_2, K_1, O_1, P_1, Q_1 e M_3), em condições de sizígia, mostram que as correntes de superfície vazante são bem mais intensas que as correntes de enchente. Isto se deve à influência do atrito do fundo, que é muito mais efetivo na enchente (onde a coluna d'água tem maior espessura). Na Baía de Santos, nota-se grande contraste de intensidade das correntes entre o lado de São Vicente e o lado de Santos / Guarujá; nas enchentes (e vazantes) de sizígia, se tem convergência (e divergência) das correntes nos Canais de Bertioga e São Vicente e correntes num único sentido no Canal do Porto de Santos.

Os resultados obtidos com os processamentos do POM foram comparados com análises harmônicas de registros de maré disponíveis, sendo verificada uma boa concordância entre os valores de amplitude e de fase. Os autores afirmam que esta boa correlação pode ser justificada pelas correções introduzidas nas condições de contorno do modelo, após a realização de diversos processamentos. Também foram comparadas as séries temporais de maré dos resultados do modelo com nove componentes da previsão harmônica, e com 44 componentes com observações de campo referentes à Torre Grande, no Porto de Santos. Verificou-se uma boa concordância entre os resultados obtidos, exceto quanto comparados aos dados de campo, dada à ocorrência de significativas variações do nível médio do mar, devido a efeitos meteorológicos intensos.

Os aspectos de maior interesse neste estudo foram: o contraste das intensidades das circulações entre a parte mais profunda e regiões internas rasas, as marcantes diferenças de intensidade de correntes nos dois lados da Baía de Santos, a convergência / divergência das correntes nos Canais de São Vicente e de Bertioga, assimetrias de maré nas regiões rasas, e rotação anti-horária das correntes na área costeira.

Em **Harari e Camargo (1994)** é apresentada a simulação de nove principais componentes de maré na plataforma sudeste brasileira, através de implementação de modelo numérico hidrodinâmico. A área modelada abrangeu desde a Ponta do Vigia (SC) a Cabo Frio (RJ), considerando da linha de costa até à isóbata de 100m. O trabalho teve como objetivo apresentar os processamentos do modelo para as nove principais componentes de maré, sendo processada cada uma delas isoladamente, de modo a determinar suas características na área de interesse, e especificamente suas linhas cotidais e as elipses de correntes na superfície. As componentes de maré escolhidas foram: M_2, S_2, N_2, K_2, K_1, O_1, P_1, Q_1 e M_3, que representam mais de 90% do efeito de maré na área estudada (MESQUITA; HARARI, 1983 APUD HARARI; CAMARGO, 1994). Não houve um período específico para as simulações, pois o objetivo foi o de obter características permanentes da propagação de cada uma das constituintes de maré.

O modelo utilizado nas simulações é tridimensional, linear, barotrópico e de meso escala. A grade oceanográfica utilizada possui espaçamento horizontal de 13,89 quilômetros e para os processamentos foi utilizado um passo de tempo de 120 segundos. Para os pontos do contorno aberto, onde são impostas as condições de contorno laterais do modelo, foram utilizados os resultados de análises de séries temporais de alturas de maré obtidas em três pontos da Plataforma Continental, restritos a este contorno. Estes pontos são: Plataforma Continental do Rio de Janeiro (23º23,0'S 43º17,0'W); Plataforma Continental de Santos (25º01,0'S 45º42,0'W) e Plataforma Continental de Paranaguá (26º18,1'S 47º30,6'). As constantes harmônicas de amplitude e de fase das componentes astronômicas de maré foram obtidas através da aplicação dos métodos de análise de maré. Os valores de fase e amplitude de cada uma das componentes, nos demais pontos da borda da grade além dos três pontos já citados, foram obtidos através de interpolação linear. Desta

maneira foi possível especificar a altura da maré astronômica em todos os pontos do contorno aberto, por meio de previsões harmônicas, a partir das correspondentes amplitudes e fases das ondas de maré.

Os mapas cotidais de fase e amplitude obtidos mostram as áreas de amplificação e de atenuação para as ondas de maré, assim como os seus sentidos de propagação. As elipses de correntes na superfície indicam o comportamento das correntes de maré na área modelada, principalmente em termos dos giros, direções predominantes e intensidades típicas. Foi observada uma boa concordância entre os resultados do modelo com as previsões harmônicas das componentes de maré para as estações de Cananéia, Santos e Ubatuba. Os resultados mostram que as marés são amplificadas na parte sul da plataforma modelada, provavelmente devido à menor declividade da mesma, se comparada à parte norte. Concluiu-se que com esses resultados é possível realizar previsões, com boa precisão, das alturas de maré para qualquer ponto da área estudada.

Com o objetivo de estudar a composição das principais componentes astronômicas de maré, sobreposta a efeitos meteorológicos extremos, para períodos específicos de maré, **Camargo e Harari (1994)** utilizaram o modelo matemático implementado, aplicando a metodologia de especificação de condições meteorológicas ao modelo de circulação marítima, baseada apenas em cartas sinóticas de pressão atmosférica de superfície. As componentes de maré consideradas nos processamentos do modelo foram: M_2, S_2, N_2, K_2, K_1, O_1, P_1, Q_1 e M_3. Os períodos utilizados para as simulações foram de 27/05/83 a 14/06/83 (19 dias) e 30/05/85 a 11/06/85 (13 dias). Estes períodos são caracterizados por grandes elevações do nível médio do mar, por influência de sistemas meteorológicos intensos.

Os processamentos do modelo requereram a especificação das alturas de maré nos contornos abertos e a definição dos campos de gradiente de pressão e de atrito do vento na superfície. A parcela astronômica da elevação do nível do mar foi obtida da mesma forma descrita anteriormente. A inclusão da parcela de maré meteorológica baseou-se em estimativas das oscilações horárias do nível médio do mar na costa, através da aplicação de um filtro de médias móveis às alturas horárias de maré observadas nas estações de Paranaguá, Cananéia, Santos, Ubatuba e Rio

de Janeiro. A obtenção de variáveis meteorológicas (pressão atmosférica e vento, ambos na superfície do mar) se deu a partir de cartas sinóticas. Com cartas sinóticas diárias de pressão atmosférica na superfície foram realizadas reduções dos dados na área de estudo, seguidas de interpolações lineares no tempo. Através da relação geostrófica (balanço entre a força de Coriolis e a força de gradiente de pressão) foi possível calcular o vento geostrófico e, com correções empíricas, determinou-se o vento real aproximado. Este procedimento permitiu obter séries temporais de pressão e de vento já filtradas, ou seja, séries que contêm apenas informações sobre variações de baixa freqüência, as quais são as principais responsáveis pela circulação de meso-escala induzida por efeitos meteorológicos.

O objetivo principal do trabalho foi o de aplicar uma metodologia de obtenção de dados meteorológicos desenvolvida por Hasse e Wagner (1971) e Hasse (1974), apud Camargo e Harari (1994), visando considerar as influências dos campos de pressão atmosférica e vento na circulação oceânica de meso-escala nesta plataforma. Concluem os autores que esta metodologia descreveu razoavelmente bem os fenômenos meteorológicos observados nos períodos de interesse.

As intensidades dos ventos obtidas foram muito maiores do que as observadas na costa. No entanto, estas medições sofrem muita influência da topografia local e contém alto grau de incerteza.

Os resultados do modelo indicam que é possível associar o centro de alta pressão do Atlântico Sul e as correspondentes elevações de superfície paralelas à linha da costa a um sistema geostrófico de circulação oceânica. Por outro lado, a passagem de frentes frias na área induz sistemas transientes que modificam o padrão geostrófico, também mudando a configuração das isolinhas de elevação de superfície.

O estudo de **Yassuda (1991)** teve como objetivo a implementação de um modelo matemático para estudar o transporte de sedimentos no Canal Principal do Estuário de Santos, o canal do Porto, para condições oceanográficas típicas de quadratura e sizígia.

O autor apresenta o Sistema Estuarino de Santos como um dos mais importantes pólos de desenvolvimento urbano e industrial do país. A expansão

descontrolada de demandas hídricas competitivas para a região estuarina produziu sérios conflitos entre os seus usos, levando à deterioração do meio ambiente. A complexidade envolvida nos impactos causados ao meio ambiente gera a necessidade de estudos amplos e abrangentes, com o devido entendimento dos processos hidrodinâmicos, além do contexto biológico-ecológico. Assim, são de fundamental importância estudos que permitam entender os processos de transporte de sedimentos através de formulação matemática.

As interações envolvidas no transporte de sedimentos são extremamente complexas. Teoricamente, as forças geradoras são a maré, o vento, as descargas de água doce e o movimento das ondas, que produzem os perfis de velocidade.

A partir da análise do comportamento hidráulico e sedimentológico do complexo estuarino de Santos, realizada pela SONDOTÉNICA (1977), o autor adaptou um modelo matemático bidimensional verticalmente integrado desenvolvido por Blumberg, 1975 (apud YASSUDA, 1991), calibrando-o para representar adequadamente condições de sizígia e quadratura típicas da região. Foram realizados estudos de transportes de fundo e de superfície utilizando a formulação desenvolvida por Van Rijn (1984), o que possibilitou verificar que, devido às características do campo de velocidades, somente em condições extremas ocorre o transporte sedimentológico de fundo. Assim, foi possível concluir que o transporte em suspensão é predominante.

O comportamento da maré na Baía de Santos foi caracterizado a partir de oito principais componentes, que levam em conta 85% da amplitude total da maré, a saber: M_2, S_2, N_2, K_2, K_1, O_1, P_1 e Q_1.

O estudo do transporte de sedimentos no Canal Principal do Estuário de Santos foi realizado a partir de algumas simplificações que adaptassem suas características singulares ao padrão de estuários parcialmente misturados.

Os resultados da simulação hidrodinâmica para as condições de quadratura mostraram uma boa concordância entre o modelo e os dados disponíveis, especialmente para o parâmetro salinidade. No campo de velocidades, as discrepâncias entre os resultados do modelo e os dados de campo são provavelmente devidas às irregularidades geométricas não resolvidas pelo modelo.

Mesmo assim, houve uma razoável representação dos processos de transporte e mistura através destes resultados.

A complexidade geomorfológica do sistema estuarino de Santos impôs restrições a algumas simulações, o que impossibilitou a obtenção de resultados quantitativos exatos para as taxas de transporte resultante no estuário.

Outro trabalho de avaliação da Baía e Estuário de Santos foi realizado em 1990, quando a Ove Arup & Partners foi contratada pela Prefeitura de Santos para elaborar um estudo que recomendasse uma solução para restringir os elevados níveis de poluição das praias de Santos **(HR WALLINGFORD, 1990).** Após avaliarem dados de circulação, variação da maré, processos de ondas, qualidade da água e movimentação dos sedimentos e, identificados os problemas, concluíram que a maior fonte de poluição que afetava as praias tinha origem no Estuário de Santos, em particular nas descargas de efluentes durante a maré vazante. Portanto, afirmaram que seria necessário desviar o fluxo vazante da praia enquanto o estado geral do estuário apresentasse este nível de contaminação. Foi observado também que outros fatores afetavam o nível de poluição e que, por exemplo, seria interessante avaliar a performance do emissário submarino, já existente na época.

A solução recomendada para que o fluxo vazante proveniente do canal fosse afastado da área da praia foi indicar a construção de um molhe ao longo do lado oeste do Canal do Porto, para forçar a água a sair da baía. O molhe sairia do final do Canal do Porto e se estenderia por uma distância de no mínimo 2 km. Previa-se que este molhe direcionaria o fluxo da maré vazante para fora da baía, o que minimizaria o efeito de poluição nas praias. No entanto, foi observado que com a introdução deste molhe a circulação geral da baía sofreria mudanças, as quais deveriam ser estudados. Entendeu-se que uma resposta sobre o comportamento hidrodinâmico da região, com a introdução do molhe, poderia ser dada através da avaliação por modelagem matemática ou modelo físico em escala reduzida.

Nas décadas de 1970 e 1980 estudos de molhes já haviam sido conduzidos em modelo físico, tendo em vista interesses portuários de fixação do canal de acesso.

Neste ponto, nota-se que embora houvessem programas mais sofisticados para avaliação hidrodinâmica da baía, optou-se pelo modelo bidimensional. Esta escolha

pareceu apropriada, em primeira instância, visto que suas limitações seriam avaliadas na interpretação dos dados. A principal vantagem da aplicação do modelo bidimensional seria o custo, relativamente baixo, e a conveniência na modelagem.

De acordo com HR Wallingford (1990), em agosto de 1990 a HR Wallingford foi contratada pela Ove Arup & Partners, em nome da Prefeitura de Santos para fazer esta modelagem. O modelo usado no estudo foi o TIDEFLOW – 2D. O TIDEFLOW – 2D é um modelo matemático da TIDEWAY Systens desenvolvido pela Hydraulics Research, Wallingford, Reino Unido, e foi usado com o objetivo de avaliar os prováveis impactos que a construção do molhe traria à Baía de Santos. A fim de avaliar os efeitos, padrões de marés enchentes e vazantes foram produzidos para as condições existentes e com o molhe construído. Também foram calculadas trajetórias das plumas do emissário resultantes das duas condições.

O espaçamento de grade adotado foi de 150 m, a área modelada foi somente a Baía de Santos e a entrada dos canais do Porto e de São Vicente. As medições de campo utilizadas como “input” para a modelagem foram fornecidas pelo Instituto Oceanográfico de São Paulo. As observações simultâneas de elevação da superfície, intensidade e direção do vento, temperatura, salinidade e intensidade e direção de correntes, duraram três períodos de 12 horas. Os dados de medição de campo indicaram, de modo geral, um regime de fluxo extremamente complexo.

Os resultados indicaram que o molhe proposto daria uma efetiva redução nos níveis de poluição das praias do lado leste da Baía de Santos. No entanto, o molhe causaria mudanças no padrão de circulação da baía e seria muito importante a avaliação da influência que estas mudanças trariam para a performance do emissário submarino localizado no centro da baía. Áreas de potencial estagnação seriam geradas, o que traria mudanças na movimentação dos sedimentos.

O trabalho, embora limitado, foi muito útil para uma avaliação inicial e mostrou que a construção do molhe traria efeitos sobre a baía. Foi recomendado, no entanto, que se fizessem mais estudos para a completa avaliação do impacto, permitindo que outras configurações fossem avaliadas. Recomendou-se, também, que o novo estudo incluísse estudos de campo mais detalhados, como levantamento batimétrico, medições de maré e de correntes. Sugeriu-se a aplicação de modelo matemático mais sofisticado, com definição tridimensional para um melhor entendimento do regime de fluxo do estuário.

4.4.2 Trabalhos de modelagem matemática de interesse para o estudo

Feitosa e Rosman (2007) propuseram um acoplamento entre modelos de campo próximo e campo afastado, com a incorporação de um modelo de decaimento bacteriano na avaliação de plumas de emissários submarinos. Através destes dois modelos foram avaliados os impactos provocados pelo lançamento de efluente.

O objetivo principal do acoplamento entre os modelos foi tornar mais realista a modelagem da pluma de indicadores de contaminação fecal no ambiente marinho, a partir da incorporação de variações temporais de todos os parâmetros envolvidos na modelagem.

A metodologia empregada propunha primeiramente acoplar o modelo hidrodinâmico ao modelo de campo próximo. Nesta etapa, as variações da vazão do efluente e dos perfis de densidade foram fornecidas ao modelo de campo próximo (NRFIELD) como arquivos de entrada. O campo de correntes atuante sobre a tubulação difusora foi calculada pelo modelo hidrodinâmico SisBAHIA (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental), e posteriormente fornecido ao modelo NRFIELD.

Na etapa seguinte houve o acoplamento entre o modelo de campo próximo e o modelo de campo afastado. Este acoplamento foi feito a partir da introdução da massa do contaminante no modelo de campo afastado, a partir de uma região fonte, cujas características coincidem com as da pluma. A adoção de uma região fonte para o lançamento do contaminante reside no fato de que o quê ocorre no seu interior (campo próximo) não pode ser resolvido no modelo de campo afastado. Isto é devido às diferentes escalas espaciais e temporais envolvidas nos processos de mistura existentes nestas duas regiões. As dimensões das regiões fontes dependem do conhecimento prévio da diluição e espessura da pluma, determinadas na modelagem do campo próximo, e da vazão do efluente. A dimensão vertical da região fonte corresponde à espessura da pluma. Com relação às dimensões horizontais, o comprimento é constante e equivalente ao comprimento da tubulação difusora, e a largura é determinada através da diluição e da massa de contaminante no campo próximo.

De acordo com os autores, a variação das dimensões horizontais das regiões fontes não representa um contexto significativo na modelagem do campo afastado. A determinação da espessura e da máxima elevação atingida pela pluma é a premissa mais relevante na modelagem do campo afastado por dois motivos principais, a saber: a quantificação da radiação solar incidente sobre a pluma, e conseqüentemente as reações cinéticas de decaimento do contaminante; e a determinação da faixa do escoamento ao longo da coluna de água responsável pela advecção do contaminante e o cálculo da concentração do contaminante no campo afastado em função de sua espessura.

As simulações realizadas, inclusive com estudo de caso dos Emissários de Salvador, permitiram verificar a importância do acoplamento entre os modelos: hidrodinâmico, campo próximo, radiação solar e decaimento bacteriano, e campo afastado. O emprego destes modelos em conjunto permitiu que a modelagem de microrganismos indicadores de contaminação fecal seja sensível à variação simultânea de todos os parâmetros ambientais envolvidos, o que torna a avaliação dos impactos promovidos pelo lançamento de efluentes domésticos mais consistentes e próximos da realidade.

Cunha et al (2006) utilizaram o modelo hidrodinâmico e de qualidade da água para simular o transporte de longo termo e a evolução da poluição causada pela emissão de esgotos na Baía de Sepetiba (RJ). A proximidade da Baía de Sepetiba com a Região Metropolitana do Rio de Janeiro tem trazido vários problemas ambientais para a baía, como piora da qualidade da água devido ao lançamento de esgotos sanitários e resíduos sólidos urbanos, principalmente na parte leste da baía.

Os autores afirmam que devida à pequena profundidade e fraco padrão de estratificação, as correntes de maré são bem representadas, considerando sua variação média na coluna d'água. Portanto, o estudo de circulação hidrodinâmico e de dispersão do efluente foi desenvolvido com modelo bidimensional verticalmente integrado.

Os modelos utilizados fazem parte de um sistema chamado de SisBAHIA, desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Costeira e Oceânica, Programa de Engenharia Oceânica, na Universidade Federal do Rio de Janeiro. No seu

desenvolvimento, o modelo hidrodinâmico adota diferenças finitas na discretização temporal e elementos finitos na discretização espacial.

Modelos que simulam a distribuição temporal e espacial de parâmetro não conservativo de qualidade de água têm sido usados nos últimos anos como ferramenta científica e de gestão. No modelo de qualidade de água desenvolvido no estudo foram utilizadas as mesmas equações de transformações básicas do modelo WASP (Water Quality Analysis Simulation Program), e também foi considerada a mesma grade do modelo hidrodinâmico. As velocidades de fluxo dos coeficientes de turbulência, já computados no modelo hidrodinâmico, foram usados diretamente pelo modelo de qualidade de água.

No modelo matemático hidrodinâmico, condições de vento foram consideradas temporalmente variáveis, mas espacialmente homogêneas. Os dados de entrada usados no modelo foram uma série temporal de velocidade e direção de medidas horárias na estação da Base Aérea de Santa Cruz, próxima à baía. As curvas de maré foram impostas nas bordas abertas no domínio computacional. Foram também considerados os dados de entrada de vazão dos rios afluentes à baía. A malha consiste de 497 elementos e 2.314 nós, e o passo de tempo adotado foi de 150 segundos. A batimetria foi obtida a partir das cartas náuticas da DHN. O período de simulação foi de 20/04/1996 a 5/10/1996, sendo que durante este período houve medições de parâmetros de qualidade da água e de correntes. Os resultados mostraram que houve uma boa concordância entre os dados de medição de corrente e os resultados da modelagem.

O estudo concluiu, com relação à hidrodinâmica, que o efeito da água rasa é estimado nas variações das correntes e é responsável pela grande assimetria na distribuição das correntes de fluxo vazante. Os resultados do modelo matemático combinado estão em concordância com os dados de medições de campo.

Bleninger (2006) descreveu os resultados de um projeto hidráulico de difusores multi-portas e tecnologias de previsão de impactos nas instalações de emissários submarinos. Os aspectos hidrodinâmicos foram abordados por técnicas de modelagem computacional. Primeiramente, foi desenvolvido um programa de projeto de difusores multiportas. Posteriormente, dois modelos foram acoplados e utilizados

para análise da descarga de emissários, o CORMIX para o campo próximo e intermediário e Delft3D para o campo afastado. Por último, um sistema regulatório foi proposto para o licenciamento e monitoramento dos emissários submarinos.

Os modelos CORMIX e Delft3D foram acoplados no intuito de estudar a previsão de distribuição de bactérias na saída de emissários submarinos. O CORMIX modela o efeito de campo próximo para fontes induzidas por mistura turbulenta, e adicionalmente possui módulos que consideram a interação da borda e os processos de difusão no campo intermediário. O Delft3D modela a hidrodinâmica do ambiente e os parâmetros de qualidade da água. O algoritmo de acoplamento teve especial atenção ao campo intermediário, onde a classificação de fluxo do CORMIX foi um importante componente para esta abordagem. A proposta de acoplamento procurou primeiramente classificar os campos e os resultados das séries temporais do CORMIX para o campo próximo e intermediário, assim como calcular a entrada de dados para ambos os modelos. Esta classificação se deu conforme a resolução da grade do campo afastado escolhido e, a concentração e a geometria da pluma no campo intermediário. A etapa seguinte foi utilizar o modelo Delft3D para calcular a concentração de substância no campo afastado.

O algoritmo de acoplamento foi aplicado ao emissário de Cartagena na Colômbia. O estudo incorporou a previsão de correntes oceânicas e a distribuição da densidade na coluna d'água que foram geradas através das forçantes de vento e das condições de contorno. O sistema de classificação do fluxo mostrou que os processos envolvidos no campo intermediário foram significantes, especialmente no período de novembro de 1998. A união dos modelos foi feita pelo acoplamento dos resultados hidrodinâmicos com o modelo CORMIX da mistura no campo próximo e unindo ambos ao modelo de qualidade da água no Delft3D para prever a concentração de bactérias. Os resultados mostraram que a concordância com os padrões de qualidade foi garantida em 97% do tempo no pior cenário estudado. Além disso, a computação acoplada apresentou melhores resultados do que as abordagens tradicionais.

Fortis (2005) utilizou a modelagem computacional como ferramenta de análise do processo de dispersão de efluentes em corpos d'água, e também como suporte de decisão das agências ambientais e dos processos industriais frente à

exigência de atendimento à legislação. O autor apresenta o estado da arte de emissários submarinos que utilizam sistemas difusores multiorifícios, onde foi destacado o PEAD – Polietileno de Alta Densidade. Discutiu as principais técnicas de instalação e manutenção de emissários submarinos.

Analisou a dispersão da pluma de parâmetro conservativo, a amônia, constituinte do efluente industrial do Terminal Almirante Barroso – TEBAR, localizado no canal de São Sebastião. Foram utilizados dois métodos computacionais diferentes, o método integral (software CORMIX) e o método de volumes finitos (software FLUENT).

Os resultados de ambos os métodos apresentaram uma pluma com empuxo negativo, que submerge após alguns metros do lançamento, o que acarreta um forte impacto bêntico na área circunvizinha do sistema difusor. Os resultados da dispersão do contaminante apresentados pelo CORMIX, para o estudo de Fortis (op. cit.), foram extremamente conservadores, concluindo que o padrão de qualidade das águas somente é atingido a grandes distâncias do lançamento (200 m). Por outro lado, os resultados fornecidos pelo FLUENT apresentaram-se de acordo com os estudos de monitoramento da qualidade da água e de diluição de traçadores fluorimétricos, atingindo o padrão de qualidade das águas a poucos metros do lançamento (15 m).

Montenegro (1999) conduziu simulações numéricas utilizando o POM com o objetivo de descrever a circulação barotrópica forçada por maré e vento na Baía de Todos os Santos, no litoral da Bahia. Os objetivos secundários foram: utilizar os resultados da modelagem para determinar a importância relativa das duas forçantes em questão (maré e vento) e descrever os efeitos da variação da direção e intensidade do vento na circulação do sistema.

Conforme o autor, a literatura traz poucas informações sobre os padrões de circulação no interior da Baía de Todos os Santos. Das poucas existentes, a maioria das citações faz referência às cartas de corrente de maré da DHN. A batimetria utilizada para a modelagem teve como fonte as cartas náuticas elaboradas pela DNH.

Os dados de vento foram extraídos de uma série temporal de quatro anos e foi mantido constante no espaço e no tempo na maioria das simulações, devido à dimensão da área modelada, à pequena variabilidade do vento dentro das escalas temporais das simulações (da ordem de 5 a 10 dias) e à ausência de séries simultâneas de vento, correntes, temperatura e salinidade. Optou-se por conduzir dois tipos de simulações, uma com modelo sendo forçado por ventos típicos de inverno e outra de verão.

Para gerar as correntes de maré, a opção foi forçar a elevação do nível livre da superfície no limite oceânico sul do sistema. Como não existiam medições diretas da altura da superfície nesta região oceânica, adotou-se uma onda artificial como forçante. Essa onda foi obtida pela composição de amplitude e fase de cinco componentes de maré (M_2, S_2, N_2, K_2, O_1), fornecidas pelo modelo global de maré FES.95 (LEPROVOST, no prelo, apud MONTENEGRO, 1999).

Dados de medição de salinidade, temperatura, batimetria, ventos e correntes da região foram tratados e analisados, afim de gerar informações para a inicialização e calibração do modelo. Foi utilizada grade regular, com espaçamento constante em X e Y de 30 segundos de grau, cerca de 910m. O campo de massa, constante no tempo e no espaço, foi resultante de um par TS (temperatura e salinidade) arbitrado com temperatura de 18ºC e salinidade de 35. Apesar do campo de massa homogêneo, o modelo operou em seu modo tridimensional.

Os resultados da modelagem apresentaram boa concordância com os valores de correntes medidos. Maré e vento se mostraram importantes na determinação da circulação do sistema, com dominância geral da forçante de maré. A importância relativa entre maré e vento variou espacialmente. A mudança na direção do vento ao longo da simulação alterou, numa escala temporal de dias, os padrões de circulação do sistema. Apesar da dominância da maré na circulação local, os testes realizados indicam que a dispersão de substâncias nas águas da Baía de Todos os Santos é dependente dos padrões de vento. Nas simulações, a onda de maré penetrou na baía num intervalo de tempo inferior a uma hora. O modelo não foi capaz de reproduzir satisfatoriamente a altura da maré nas bordas da baía.

Camargo (1998) apresentou um estudo matemático integrado das circulações atmosférica e oceânica da Baía de Paranaguá, que é um importante complexo estuarino da Região Sul do Brasil. Para este estudo integrado, foi necessário conhecer as características da circulação marítima e também da circulação atmosférica na região. Assim, o trabalho teve como objetivo estudar as características destas circulações através de simulações em modelos matemáticos, uma vez que estas circulações podem ser descritas por sistemas de equações diferenciais. Em geral, para a modelagem numérica, a atmosfera tem parametrizações mais complexas do que o oceano.

A modelagem do meio atmosférico foi efetuada com o Regional Atmospheric Modeling System (RAMS) e para a modelagem do meio oceânico foi utilizado o Princeton Ocean Model (POM).

A modelagem do meio atmosférico concentrou-se nos contrastes terra-oceano, a partir da definição de uma linha da costa e de feições topográficas realistas. Com um domínio inicial centrado na baía e abrangendo praticamente todo o litoral das regiões Sul e Sudeste, foi possível resolver as características de meso-escala da região através do aninhamento de grades e, ao mesmo tempo, pode-se efetuar a assimilação de campos analisados de escala sinótica em situações de interesse.

Sobre a modelagem oceânica, foi proposto um domínio tridimensional com espaçamento horizontal de cerca de 1 km (precisamente 926,2 m) em uma grade de 90 por 70 pontos, respectivamente nas direções paralela e perpendicular à linha de costa, grade com 3.122 pontos oceânicos de cálculo e 6 níveis sigma de mesma espessura na vertical. Foram escolhidas 12 constituintes para representar o fenômeno das marés no estuário em questão (M_2, S_2, N_2, K_2, K_1, O_1, P_1, Q_1, M_3, M_4, MN_4 e MS_4). As oscilações da maré foram especificadas através dos valores exatos da previsão harmônica nas duas primeiras linhas da fronteira aberta do domínio. As correntes, distintamente das elevações de superfície, foram especificadas apenas numa linha do contorno aberto, sendo adotados os valores nos pontos internos imediatamente vizinhos à borda do domínio. O período escolhido para os processamentos do modelo oceânico foi de 27 de maio a 15 de junho de 1983.

Após as simulações de maré terem se mostradas satisfatórias e confiáveis foram feitos os testes de inclusão de campos de vento. Os níveis verticais sigma tiveram que ser readaptados nas simulações com a inclusão de vento, sendo que passou de

6 níveis nas simulações de maré para 11 níveis ao incluir a forçante de vento. Por simplicidade, considerou-se, inicialmente, apenas a componente M_2 e um campo de vento constante no espaço e no tempo, com intensidade de 5 m/s e direção de aproximadamente SE (normal à costa). O modelo foi integrado por 120 horas e apresentou resultado qualitativamente adequado. Observou-se uma circulação residual induzida pelo vento, tanto na região costeira quanto no interior da baía, a qual sobrepõe à circulação de maré, principalmente nas regiões com pista razoável para a atuação do campo de vento.

Em outro experimento mudou-se o vento para a direção paralela à costa, soprando de SW. Neste caso, os resultados mostraram alta variabilidade espacial na circulação costeira adjacente, sendo que valores cada vez mais intensos de correntes ocorriam próximos ao contorno normal à costa do lado norte do domínio. Um padrão semelhante foi obtido ao considerar o vento na direção paralela à costa, soprando de NE.

Foram efetuadas simulações com o RAMS e os dados sinóticos das “Reanalysis”. Tiveram os objetivos de avaliar o comportamento do RAMS em simulações relativamente longas (15 dias), e para avaliar a importância do escoamento atmosférico local na circulação marítima. Para avaliar o efeito do campo de vento local na circulação marítima, foram realizados dois experimentos: o primeiro envolvendo somente a composição das 12 principais constituintes de maré, e o segundo com a adição da forçante vento. Assim, subtraindo do segundo experimento os resultados do primeiro, obteve-se a estimativa do efeito isolado do vento. Analisando os valores de subtração dos resultados dos processamentos fornecidos pelo RAMS pode-se observar uma considerável influência que o vento local exerce na circulação do estuário.

Em conclusão, a modelagem oceânica abrangeu um domínio de pequena escala, cobrindo apenas o estuário e a região costeira adjacente. Mesmo assim, essa grade possibilitou avaliar detalhadamente a propagação das principais componentes de maré e os padrões de circulação gerados pelas marés e pelo vento local. A circulação de maré foi estudada através da determinação das elipses de correntes de maré na superfície, para todo o domínio, assim como das correntes residuais de maré, devidas principalmente a efeitos não-lineares. Adicionalmente, os resultados do modelo meteorológico foram utilizados como forçantes num estudo de

caso com o modelo oceânico. Isso permitiu que a circulação marítima tivesse como forçante também o vento local. Apesar da pequena pista de vento representada no POM, foram detectadas significativas variações do nível médio do mar, confirmando a importância das influências meteorológicas, mesmo em pequena escala.

4.4.3 Trabalhos de coleta de dados da região de estudo

De acordo com **SABESP (2006)**, foi efetuado um programa de monitoramento que teve suas atividades desenvolvidas pelo Consórcio ENCIBRA – FALCÃO BAUER – TECAM, “Execução de Programas de Monitoramento Ambiental da Área sob Influência do Emissário Submarino de Esgotos Sanitários de Santos / São Vicente e de Monitoramento Ambiental da Área sob Influência dos Emissários Submarinos de Esgotos Sanitários de Praia Grande – Subsistemas 1 e 2, existentes e 3, a ser implantado”.

O monitoramento ambiental foi conduzido para avaliar o lançamento de esgotos pelos emissários submarinos de Santos / São Vicente e Praia Grande e incluiu a realização de análises físicas, químicas e microbiológicas da água do mar, sedimentos, efluentes e canais artificiais. Incluiu, também, avaliação das comunidades planctônicas e bentônicas, assim como ensaios ecotoxicológicos na água, efluentes e sedimentos. Foram efetuadas medições de correntes marinhas em três profundidades, e em sete pontos distribuídos na Baía de Santos e próximos aos difusores dos emissários. Também foram feitas medições de correntes marinhas em um ponto próximo do difusor do subsistema PG2 (Praia Grande) durante 35 dias contínuos de metro em metro, as quais serviram de subsídio para as modelagens matemáticas. Os pontos de medição são apresentados na Figura 5.

Uma parte importante do trabalho foi a realização do estudo de modelagem computacional para a caracterização da hidrodinâmica local, determinação dos padrões de dispersão da pluma do emissário e previsão da concentração de contaminantes no mar.

O principal foco das análises realizadas na água do mar e sedimentos marinhos foi avaliar o nível de contaminação orgânica do ambiente na área de influência do emissário, tendo-se restringido a análises de parâmetros indicadores de matéria

orgânica, nutrientes e bactérias de origem fecal. Tais análises, associadas aos estudos sobre a estrutura das comunidades bentônicas e planctônicas e aos estudos ecotoxicológicos, fornecem informações importantes sobre a influência dos emissários submarinos na qualidade do ambiente. Nesta Tese estão sendo apresentados os dados de correntes, vento, e densidade e temperatura da água no Capítulo 7 – Base de Dados.

Figura 5 – Localização dos Pontos de Medição referentes aos trabalhos de coleta de dados da região de estudo

Em **CODESP (2002)** foi dada a continuidade ao estudo da área de descarte de material de dragagem na zona oceânica exterior à Baía de Santos, pela Universidade Santa Cecília – UNISANTA para a Companhia Docas do Estado de São Paulo – CODESP, descrito a seguir em UNISANTA (1998, 1999).

Em linhas gerais, o autor avalia que a zona onde na ocasião (em 2002) era feito o descarte de material dragado do estuário de Santos estava influenciada, em termos hidrodinâmicos e de mecanismos de transporte, pela proximidade do sistema estuarino e pelas condições de correntes oceânicas ao largo da zona costeira. Por esta razão, o estudo se propôs primeiramente a identificar e esclarecer os fenômenos mais importantes nos mecanismos de transporte de sedimentos e a seguir aplicar o modelo tridimensional, MOHID-3D, para estudar áreas alternativas para o lançamento do material dragado.

O objetivo do estudo foi dar continuidade e desenvolvimento ao estudo da área de descarte de material de dragagem na zona oceânica exterior à Baía de Santos, utilizando o modelo matemático de circulação oceânica, para estudo de descarga de lodo proveniente da dragagem dos canais de navegação, avaliando os possíveis impactos relativos às operações de lançamento e transporte de material sedimentável.

Foram efetuadas campanhas de medição de correntes, maré e vento para os períodos de inverno e verão de 2002. Através das campanhas de medições foi possível conhecer as correntes predominantes na área de lançamento do material de dragagem, bem como a situação na zona interna da Baía de Santos, de onde se obteve informações da estrutura termohalina e das correntes na superfície, meio e fundo da coluna d'água, em situação de maré enchente e vazante. Também se pode conhecer a oscilação de nível, medidas pelo marégrafo de pressão instalado na Ilha das Palmas.

Quanto ao estudo das correntes, para a campanha de verão, verificou-se que na maré enchente, as correntes nos pontos dentro da baía tem direção predominantemente para noroeste / norte / nordeste (300º a 45º) e os pontos externos, localizados após a linha imaginária entre a Ponta Grossa e Ponta de Itaipu, apresentaram direção próxima a Leste. Na maré vazante, os pontos na baía apresentaram direção preferencialmente para sul / sudeste, sendo que os demais

pontos da baía continuam com direção predominante para leste. Em ambos os casos, vazante e enchente, a estratificação se dá em toda a camada líquida na maioria dos pontos estudados.

Na campanha de inverno observa-se na maré enchente, em toda a coluna líquida, que houve uma predominância da direção norte / noroeste e nos pontos externos a direção foi paralela à costa (sudeste). Na maré vazante somente três pontos tiveram direções bem definidas, correspondentes à saída das águas do estuário, com direção sul / sudoeste. Os demais pontos tiveram direção para sudeste / leste, também em toda a coluna apurada.

De acordo com **UNISANTA (1998, 1999)** foi realizada pesquisa para a determinação das áreas de descarte de material de dragagem na zona oceânica exterior à Baía de Santos, pela Universidade Santa Cecília – UNISANTA para a Companhia Docas do Estado de São Paulo – CODESP, no período de outubro de 1998 a março de 1999.

A coleta dos dados correntométricos foi realizada com equipamentos do tipo Acoustic Doppler Current Profiler – ADCP (RD – Instruments – Workhorse). Foram coletados dados em 6 pontos. A seguir são apresentados o posicionamento e os períodos de medição dos correntógrafos ADCP de três destes pontos (ver Figura 5):

Ponto 1 - Área de lançamento do lodo pela CODESP (Bota-fora)
- 1º período: de 15/10/98 às 11:15h a 25/11/98 às 12:00 h
- 2º período: de 25/11/98 às 16:45 h a 16/12/98 às 12:00 h
- 3º período: de 28/12/98 às 13:15 h a 27/03/99 às 12:00 h

Ponto 2 - Em Frente à Mongaguá. Profundidade local: 26 metros.
- Período: de 15/10/98 às 11:00 h a 06/11/98 às 12:00 h

Ponto 7 - Em frente à Ponta Rasa. Profundidade Local: 23 metros.
- Período: de 08/03/99 às 18:00 h a 27/03/99 às 13:15 h

Os correntógrafos foram programados para um intervalo amostral de 15 minutos e cada camada amostral refere-se a 1 metro de coluna d'água. Foi instalado em outubro de 1998 um marégrafo na Laje da Conceição.

Como um dos objetivos da pesquisa da UNISANTA foi o de estabelecer um modelo de circulação oceânica da área marítima imediatamente à frente da Baía de Santos, devidamente validado e calibrado, estes dados obtidos pelos equipamentos foram analisados e comparados com os valores obtidos pelo modelo numérico (Modelo MOHID – HIDROMOD) utilizado pela UNISANTA. Na análise da velocidade e rumo das correntes, correlacionados com o rumo do vento, através dos valores obtidos pelos ADCP 01 e 02 (Pontos 1 e 2), constatou-se a tendência das correntes serem fortemente influenciadas pelo vento.

Outros dados de medição de corrente foram obtidos através de cruzeiros realizados a partir do Projeto LOESS – 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 (**FUNDESPA, 1999**).

Foram realizadas medidas diretas de corrente em dois fundeios (PG1 e PG2), localizados a 4.500 m de distância da praia, um na altura dos difusores do emissário da Praia do Forte e outro na altura de Mongaguá (ver Figura 5). Foram realizadas 5 campanhas, descritas na Tabela 2.

Tabela 2 - Atividades realizadas nos cruzeiros correntométricos na Praia Grande – (FUNDESPA, 1999)

Campanha	Trabalhos desenvolvidos:
PG-01/94 entre os dias 24 e 25/9/94	Lançados os fundeios PG1 e PG2 no dia 11/11/94. Profundidade dos fundeios PG1 e PG2 foi de 14 e 13 m, respectivamente. Os correntógrafo em PG1 estiveram situados a 4 e 9 m de profundidade e em PG2 a 4 e 8 m.
PG-02/94 entre os dias 19 e 21/12/94	Recuperado o fundeio PG1 em 21/12/1994. Os dados dos dois correntógrafos foram lidos. O relançamento ocorreu na mesma posição do lançamento anterior.
PG-01/95 no dia 5/1/95	Recuperado o fundeio PG2 em 5/1/1995. Os dados dos dois correntógrafos foram lidos. O relançamento ocorreu na mesma posição do lançamento anterior.
PG-02/95 entre os dias 15 e 16/2/1995	Recuperado o fundeio PG2 em 16/2/1995. O correntógrafo situado na profundidade de 8 m apresentou pane eletrônica, não tendo registrado os dados. O outro correntógrafo teve seus dados lidos. O relançamento ocorreu na mesma posição do lançamento anterior.
PG-03/95 no dia 20/4/1995	Recuperado o fundeio PG1 em 20/4/1995. Os dados dos dois correntógrafos foram lidos.

Conforme **FUNDESPA (1999),** em 1998 foram efetuadas simulações de dispersão da concentração de efluentes para o Emissário Submarino de Mongaguá. As atividades de campo realizadas na região da Praia Grande e Mongaguá, durante o verão de 1994/1995, possibilitaram a obtenção de um conjunto de dados inédito para a região. Esses dados permitiram que os experimentos de simulação da mistura do efluente do emissário submarino projetado para Mongaguá com as águas costeiras tivessem alta confiabilidade para a época de verão.

Analisando os dados coletados pela FUNDESPA no verão de 1994/1995, bem como alguns poucos dados históricos para o inverno, estabeleceu-se um conjunto de parâmetros ambientais que foram utilizados nas simulações. A inexistência de dados de corrente de boa qualidade para o inverno forçou a FUNDESPA a utilizar nessa estação do ano os mesmos dados do verão. Na Tabela 3 são apresentados os valores de intensidade das correntes utilizados pela FUNDESPA para os estudos de dispersão para o emissário submarino de Mongaguá.

Tabela 3 – Velocidade (cm/s) das correntes durante o verão para a região de Mongaguá. Dados utilizados pela FUNDESPA para estudos de dispersão

Profundidade	Média	Máxima	Média	Máxima
	Paralela Mongaguá-Santos (NE)		Paralela Santos-Mongaguá (SW)	
4 m	30	90	30	60
9 m	25	60	25	30
	Perpendicular Divergente		Perpendicular Convergente	
4 m	20	40	20	40
9 m	15	40	15	40

Na Tabela 3: *Paralela* significa correntes paralelas à costa, *e Mongaguá-Santos* e *Santos-Mongaguá* indicam o sentido dessas correntes paralelas. O termo *Perpendicular* significa correntes normais à costa; *Divergente* indica o sentido da costa para o mar aberto e *Convergente* o sentido do largo para a costa.

O relatório **FUNDESPA (1996)** apresenta as atividades de campo desenvolvidas para a SABESP, que teve o objetivo de coletar dados de temperatura, salinidade,

velocidade e direção da corrente marinha, a fim de caracterizar as condições de inverno das massa de água e da circulação na Baía de Santos.

A coleta de dados deu se em 5 pontos, nos seguintes locais (ver Figura 5):

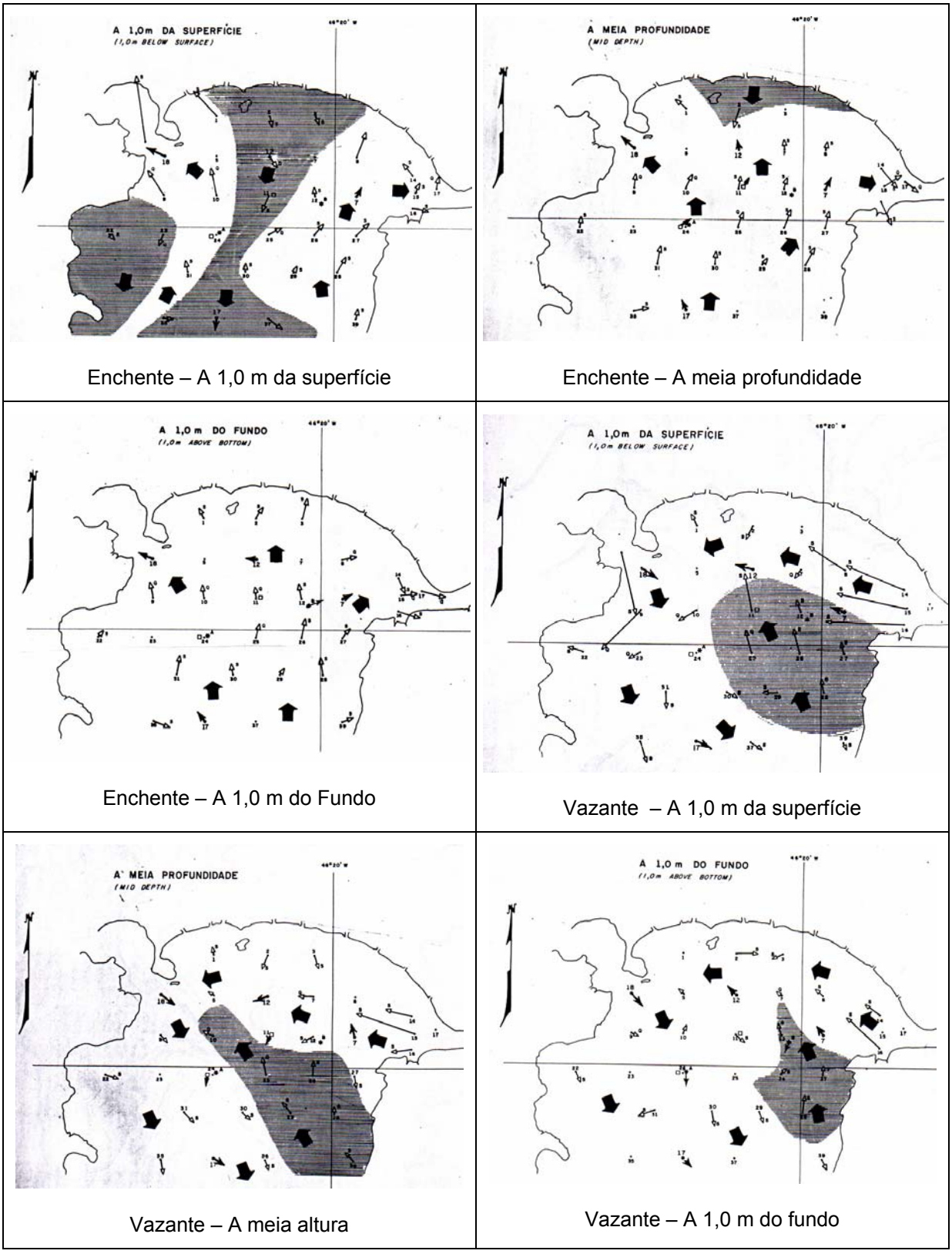
- ponto A: em frente à ilha de Urubuqueçaba;
- ponto B: ao lado do centro do Emissário Submarino com o Canal de São Vicente;
- ponto C: ao lado do centro do Emissário Submarino com o Canal de Santos;
- ponto D: na saída do efluente do Emissário Submarino de Santos;
- ponto F: na saída do Canal de Santos.

O período total do trabalho de campo foi de aproximadamente um mês e meio, de 25/07 a 06/09/95, considerando a mobilização, coletas e desmobilização.

A distribuição espacial e temporal das massas de água, caracterizadas por dados de temperatura e salinidade, foi obtida através do perfilamento vertical com uma sonda CTD. Os dados de velocidade e direção da corrente foram obtidos por correntógrafos compostos por um módulo de memória programável, banco de dados e sensores de velocidade, temperatura e direção da corrente.

O relatório não foi conclusivo, apenas apresenta os dados de medição sem discuti-los e sem aplicar um tratamento estatístico a eles.

Conforme **SONDOTÉCNICA (1977)** foram apresentados os esquemas de circulação hidráulica na Baía de Santos, referentes às fases enchente e vazante, para as profundidades a 1,0 m da superfície, à meia profundidade e a 1,0 m do fundo, que são mostrados na figura apresentada a seguir.



Enchente – A 1,0 m da superfície | Enchente – A meia profundidade

Enchente – A 1,0 m do Fundo | Vazante – A 1,0 m da superfície

Vazante – A meia altura | Vazante – A 1,0 m do fundo

Figura 6 – Circulação da Baía de Santos nas fases enchente e vazante na superfície, meia profundidade e fundo. Fonte: Sondotécnica (1977)

O trabalho do **INPH (1974)** apresentou os resultados das medições hidráulicas na Baía de Santos, realizadas durante os anos de 1972 e 1973. O INPH procurou estudar as causas de assoreamento do Sistema Estuarino de Santos e a estabilidade de um novo canal de acesso ao Porto de Santos.

O programa de medições de correntes foi dividido em duas partes: (i) medições em São Vicente, que teve o objetivo de estudar a erosão nas praias de São Vicente; e (ii) medições na Baía de Santos, que teve como objetivo o estudo da evolução dos fundos, tendo em vista o traçado e o aprofundamento do canal de acesso do Porto.

Na Baía de Santos foram estudados 24 pontos (ver Figura 5). Todas as medições foram executadas com correntômetro, determinando se a direção e intensidade da corrente de 2 em 2 metros, ao longo da vertical do ponto pesquisado. As medições estendiam-se por toda uma maré, vazante ou enchente e preferencialmente eram executadas durante as marés de sizígia. Em dois pontos na Baía de Santos (pontos 24 e 11) foram executadas medições com correntógrafo à meia-água de profundidade.

As medições com correntógrafo foram iniciadas no dia 9 de dezembro de 1972, no ponto 24, medindo corrente a 5 metros do fundo. O aparelho registrou medidas até o dia 9 de abril de 1973 e a partir desta data o aparelho foi deslocado para o ponto 11, onde as correntes foram medidas também a 5 metros do fundo.

Não levando em consideração os efeitos de temperatura e salinidade no estudo das correntes, o relatório do INPH faz os seguintes comentários:

- Na entrada do canal de acesso ao porto constatou-se a velocidade de até 1,18 m/s na vazante e a meia-água de profundidade. Nas marés de enchente verificou-se a velocidade de 1,10 m/s à meia-água de profundidade.
- Próximo aos pontos 12 e 13 (profundidade de 10 m) e junto ao fundo observa-se nas vazantes uma inversão de correntes. Da meia altura para a superfície constatou-se velocidade da ordem de 0,6 m/s (correntômetro), o que vem confirmar os valores registrados pelo correntógrafo. As direções das correntes eram 270º a 290º, observando-se a influência da boca do estuário.

- Junto à praia de Santos e Itararé não se mediu velocidades superiores a 0,30 m/s.
- Próximo à ilha das Palmas e Ponta dos Limões, evidenciou-se a formação de corrente inversa por ocasião das vazantes (pontos 28 e 29).
- Próximo aos pontos 22, 23, 24, 25, 26, 29, 30, 31, 32 e 33 a intensidade das correntes chegaram a alcançar 0,4 m/s, tanto na enchente como na vazante.
- Na linha dos pontos 34 a 39, constatou-se que, por ocasião das marés enchente, próximo ao fundo, o sentido das correntes é para o interior da baía, enquanto na superfície as correntes têm uma tendência para leste.
- Genericamente pode-se dizer que as correntes de maré na Baía de Santos são fortemente influenciadas pelas frentes frias, e podem ser consideradas como ligeiramente giratórias.

4.4.4 Considerações Finais sobre os Estudos Anteriores

A revisão dos estudos anteriores apresentada deu subsídio para escolha do tema e mostrou uma rica variedade de metodologias e resultados, que teve grande valia na elaboração desta Tese.

A seguir apresenta-se uma contextualização dos dados de entrada utilizados nos diversos trabalhos apresentados, assim como uma discussão dos resultados destes estudos. São apresentados e discutidos, em alguns subitens, parâmetros relevantes de dados de entrada, como maré, vento, batimetria e grades batimétricas. Por fim, são discutidos resultados significativos que serviram de base para a elaboração desta Tese.

Dados de maré:

Com relação aos dados de maré, a utilização de um número reduzido de componentes de maré nas modelagens numéricas foi utilizada por Harari e Camargo (1998), Yassuda (1991), Doodson (apud DHI, 1998), Camargo (1998), Montenegro (1999), Baptistelli (2003) e Picarelli (2006), sendo que todos apresentaram bons

resultados no desenvolvimento de suas modelagens. Portanto, pode-se concluir que é usual a adoção desta metodologia em modelagens matemáticas. Os resultados do estudo da composição das principais componentes de maré de Harari e Camargo (1994) foram utilizados na metodologia de Baptistelli (2003) e estão sendo também utilizados neste trabalho.

Dados de Vento:

Sobre os dados de vento, Picarelli (2006) afirma que na região costeira adjacente predominam tanto ventos locais de ENE a ESE, como ventos SE a SW. Já os dados relativos ao modelo de circulação atmosférica global NCEP determinam ventos típicos na região de E-NE e períodos de reversão S-SW (frentes frias). As médias mensais permitiram a determinação das características gerais dos padrões de vento na região, o que evidenciou ventos típicos mais intensos no inverno que no verão, para os meses considerados (julho/2001 e janeiro/2002).

Se comparados estes dados com os ventos medidos na estação meteorológica em Iguape (NUCLEBRÁS, 1982, 1984) no período de fevereiro a dezembro de 1982 pode-se notar uma concordância quanto aos ventos de maior freqüência que provieram de E (nos meses de março, setembro, outubro e novembro). No entanto, nos outros meses (fevereiro, abril, maio, junho, julho, agosto e dezembro) os ventos de maior freqüência provieram de NW e NNW. Com relação aos ventos de maior intensidade, estes provieram de S e SW nos meses de julho e agosto, caracterizando o inverno como o período de ventos mais intensos em 1982, concordando com o que ocorreu em julho/2001.

Observando, ainda, dados de vento locais, mais a nordeste do ponto de Iguape, na ilha da Moela, podemos observar ventos mais freqüentes provenientes de E a SE e de W e WSW, para o período de janeiro a dezembro de 2000. Já para os ventos mais intensos, estes ocorreram no verão e provieram de WNW (Dados do Banco Nacional de Dados Oceanográficos – BNDO).

Dados coletados na Ilha das Cabras nos períodos de verão, de 7de fevereiro a 31 de março de 2002 e de inverno, de 15 de julho a 31 de agosto de 2002 mostram predominância de ventos de SE (verão) e S (inverno). Os ventos mais intensos são de SW-SSW para o verão e o inverno (CODESP, 2002).

Para os registros obtidos entre julho de 2005 a dezembro de 2006 na Praia Grande pode-se observar que os ventos mais freqüentes ocorreram ao longo da direção norte-sul, com maior incidência de ventos proveniente de Norte, evidenciando a ação da brisa, com a predominância da brisa terrestre. Os ventos mais intensos são provenientes de SW e podem ser associados às passagens de sistemas frontais. Já os dados observados pelo NCEP para este período (julho/2005 a dezembro/2006) mostram que o vento regional mais freqüente foi proveniente de E e NE e os ventos mais intensos provieram do quadrante S e também foram associados à incidência de frentes.

A partir de todas estas observações de dados de ventos podemos notar que os ventos mais intensos provieram do quadrante Sul (SW a SE), na maioria dos casos, e também podem ser associados às passagens de sistemas frontais. Na Ilha da Moela os ventos mais intensos provieram de W a WNW, provavelmente devido aos efeitos orográficos e à brisa terrestre. Os ventos típicos mais freqüentes ocorrem de NE a E, exceto os coletados na Ilha da Moela e os da Ilha das Cabras, também provavelmente devido aos efeitos orográficos e da brisa.

Batimetria:

Quanto à fonte dos dados de batimetria, foram citados cartas náuticas, folhas de bordo e levantamento batimétricos, que são as mesmas fontes de dados utilizadas neste trabalho.

Grades batimétricas:

A utilização de grades principais e grades aninhadas foram citadas em Picarelli (2006), SABESP (2006), CODESP (2002) e Gordon (2000). Em Baptistelli (2003) e HR Wallingford (1990), onde as áreas modeladas são pequenas, foi utilizada uma única grade de 300 m e 150 m, respectivamente. Para a região costeira da Baixada Santista foi utilizado por Harari e Camargo (1998) um espaçamento de 1000 m. Camargo (1998) e Montenegro (1999) utilizaram para as regiões da Baía de Paranaguá e Baía de Todos os Santos grades de 926,2 m e 910 m, respectivamente. No entanto, em estudo de meso-escala, com limites entre a Ponta do Vigia (SC) e Cabo Frio (RJ), apresentado por Harari e Camargo (1994) utilizou

um espaçamento maior, de 13,89 km. Em CODESP (2002) foi utilizado um modelo geral com limites em Cananéia (litoral sul) e São Sebastião (litoral norte) com espaçamento de 1 a 3 quilômetros, e no modelo local de Santos foi considerado o espaçamento de 450 metros.

Estes valores serviram de referência na escolha das grades batimétricas e dos espaçamentos adotadas neste trabalho.

Na Figura 7 é apresentado, de forma esquemática, o desenho do contorno das grades batimétricas utilizadas nos trabalhos anteriores, apresentados neste capítulo. Nesta figura também são apresentados os contornos das grades utilizadas nesta Tese.

Resultados:

Um resultado interessante foi o de Yassuda (1991), no qual avalia que o transporte de sedimentos em suspensão é predominante sobre o transporte sedimentológico de fundo, no canal principal do Estuário de Santos. Esta conclusão é um importante subsídio para validar, que, em tese, o estudo do comportamento dos efluentes leves na região da Baixada Santista e Baía de Santos poderá ser avaliado a partir do entendimento do padrão da circulação hidrodinâmica da região.

Na maioria dos estudos foi considerada a forçante do vento, no entanto fica evidente que sua inclusão torna a modelagem mais difícil de ser implementada. Em Gordon (2000) a forçante do vento foi utilizada constante no tempo e no espaço. Em Cunha et al (2006) e Baptistelli (2003) condições de ventos são consideradas variáveis temporais, mas espacialmente homogêneas. Em Montenegro (1999) o vento foi mantido constante no tempo e no espaço na maioria das simulações. Picarelli (2006) afirma que a circulação devida aos ventos é a segunda mais importante. Montenegro (1999) conclui que a importância relativa entre maré e vento variou espacialmente e que, apesar da dominância da maré na circulação local, os testes realizados indicaram que a dispersão de substância nas águas da região de seu estudo é dependente dos padrões de vento. Baptistelli (2003) concluiu que a forçante do vento apresentou influência relevante na circulação hidrodinâmica da área da Praia Grande, inclusive no processo de calibração do modelo pode-se notar

a resposta à introdução dos dados de vento e notar como a intensidade das correntes era influenciada por este efeito.

Poucos dos trabalhos apresentados tiveram os resultados das modelagens comparados aos dados de medição de campo, muitas vezes pela inexistência destes dados, ou pela não existência de medições simultâneas de corrente, maré e vento. Os trabalhos de Cunha Et al (2006), SABESP (2006), Baptistelli (2003), Harari & Camargo (1998) e Yassuda (1991) compararam, de alguma forma, os resultados de modelagem matemática com as medições de campo e obtiveram boa concordância.

Figura 7 – Figura esquemática dos contornos das grades batimétricas utilizadas em trabalhos anteriores

5 DESCRIÇÃO CONCEITUAL DOS MODELOS MATEMÁTICOS UTILIZADOS

Neste capítulo está apresentada, resumidamente, a descrição dos modelos matemáticos empregados na pesquisa.

5.1 MIKE 21

5.1.1 Considerações Iniciais

O modelo hidrodinâmico MIKE 21, desenvolvido pelo DHI – DANISH HYDRAULIC INSTITUTE WATER & ENVIRONMENT, é um sistema de modelagem matemática para simulação das variações do nível e fluxo d'água em estuários, baías e áreas costeiras em geral. Simula fluxos variáveis em duas dimensões numa única camada (verticalmente homogênea) e pode ser aplicado em um grande número de estudos ligados à Engenharia Costeira.

A utilização deste modelo está sendo disponibilizada por meio de uma Licença Educacional para o Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica da Universidade São Paulo, fornecida pelo DANISH HYDRAULIC INSTITUTE – DHI WATER & ENVIRONMENT.

O MIKE 21 é um modelo de diferenças finitas com espaçamento constante da grade nas direções x e y. Para descrever a resistência do leito pode-se escolher o Número de Chezy ou o Coeficiente de Manning. A viscosidade tem parametrização do tipo Smagorinsky. O modelo possui módulos de pré-processamento de dados e pós-processamento de resultados (Módulo PP), possibilitado que a entrada de dados seja feita de modo interativo e de fácil compreensão, assim como, fornece resultados claros e de fácil interpretação. O modelo também possui um módulo de previsão e análise de marés. Em Baptistelli (2003) são descritos tópicos relevantes para o entendimento do processo de modelagem aplicado, assim como em seu Apêndice foram apresentados, de forma resumida, a descrição das equações

principais, a formulação numérica e o algoritmo aplicado no módulo hidrodinâmico do MIKE 21, o MIKE 21 HD.

Os níveis d'água são resolvidos em uma grade retangular que cobre a área de interesse onde são dados de entrada a batimetria, os coeficientes de resistência do leito, o campo de vento, as condições de contorno, entre outros. O sistema resolve equações de incógnitas dependentes no tempo, não lineares da continuidade e da conservação do momento. A solução é obtida usando um esquema de diferenças finitas de segunda ordem de precisão.

Os efeitos incluem:

- Momentum convectivo
- Tensão de radiação no leito
- Tensão de radiação devida ao vento na superfície
- Gradientes de pressão barométricos
- Forças de Coriolis
- Dispersão do momentum (através, por exemplo, da formulação de Smagorinsky)
- Correntes induzidas pelas ondas
- Fontes e sumidouros (massa e momentum)
- Evaporação
- Cálculos em planícies de maré

As seguintes equações, a equação da conservação de massa e a equação do momento integrada na vertical, descrevem as variações do fluxo e do nível d'água:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0 \qquad (6)$$

$$\left.\begin{aligned} &\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{p^2}{h}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{pq}{h}\right) + gh\frac{\partial \zeta}{\partial x} \\ &+ \frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{C^2.h^2} - \frac{1}{\rho_w}\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(h\tau_{xx}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(h\tau_{xy}\right)\right] - \Omega p \\ &- fVV_x + \frac{h}{\rho_w}\frac{\partial}{\partial x}\left(p_a\right) = 0 \end{aligned}\right\} \qquad (7)$$

$$\left.\begin{aligned} &\frac{\partial q}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{q^2}{h}\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{pq}{h}\right)+gh\frac{\partial \zeta}{\partial y} \\ &+\frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{C^2.h^2}-\frac{1}{\rho_w}\left[\frac{\partial}{\partial y}\left(h\tau_{yy}\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(h\tau_{xy}\right)\right]+\Omega p \\ &-fVV_y+\frac{h}{\rho_w}\frac{\partial}{\partial_y}\left(p_a\right)=0 \end{aligned}\right\} \quad (8)$$

Sendo:

h (x,y,t)	profundidade da água (m)
ζ *(x,y,t)*	elevação da superfície (m)
P,Q (X,Y,T)	densidade de fluxo nas direções x e y (m^3/s/m) = (uh,vh); (u,v) = profundidade média das velocidades nas direções x e y
C(x,y)	resistência de chezy ($m^{1/2}$/s)
g	aceleração devido a gravidade (m/s^2)
f(V)	fator de atrito do vento
V, V_x.V_y(x,y,t)	velocidade do vento e componentes da direção em x e y (m/s)
Ω*(x,y)*	parâmetro de Coriolis, depende da latitude (s^{-1})
P_a*(x,y,t)*	pressão atmosférica ($kg/m/s^2$)
ρ_w	densidade da água (kg/m^3)
x,y	coordenadas (m)
t	tempo (s)
$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$	componentes do efeito de cisalhamento

O MIKE 21 faz uso da “Alternating Direction Implicit (ADI)”, técnica para integrar as equações de conservação de massa e do momento no tempo e no espaço. As equações matrizes que resultam, para cada direção e cada linha da grade, são resolvidas por um algoritmo de varredura dupla “Double Sweep”.

O MIKE 21 tem as seguintes propriedades:

- Centraliza todos os termos diferentes e os coeficientes dominantes, sem recorrer à interação.
- Discretização do erro numa expansão da série de Taylor.
- Um algoritmo de solução bem-condicionado, confiável e de fácil operação.

Neste trabalho, além da aplicação de ferramentas já implementadas em Baptistelli (2003), estão sendo utilizadas as ferramentas para entrada de dados de variação espacial do vento e condições de contorno com a transferência de dados das bordas abertas (“transfer boundary”). Estas ferramentas estão sendo descritas, a seguir:

5.1.2 Ferramentas do MIKE 21 – Geração de Vento

A força devido ao vento é calculada a partir da seguinte lei quadrática:

$$C_W \frac{\rho_{ar}}{\rho_{água}} W^2 , \qquad (9)$$

Onde C_W é o coeficiente de atrito do vento, ρ é a densidade e W é a velocidade do vento em m/s, 10 m acima da superfície. O fator de atrito do vento pode ser usado como parâmetro de calibração do modelo.

As condições de vento podem ser especificadas de três maneiras:

- Como um vento soprando de uma única direção e com uma mesma magnitude em toda a área do modelo por todo um período de simulação, portanto constante no tempo e no espaço.
- Como um vento que varia a magnitude e a direção durante o período de simulação, mas é o mesmo em toda a área do modelo. Portanto, varia no tempo e é constante no espaço.
- Como um vento de magnitude e direção variáveis no tempo e no espaço. Nesse caso deve ser preparado um arquivo de dados contendo as componentes de velocidade do vento e pressão do ar, antes de fazer a simulação hidrodinâmica. Isso pode ser feito usando programas de geração de vento do MIKE 21 (vento gerado por ciclone e pressão ou vento gerado sobre base digitalizada de campos de pressão). Ou pode-se elaborar uma entrada de dados num arquivo de formato ASCII. A velocidade do vento e a pressão devem ser dadas em três itens separados no arquivo de dados. O primeiro deve ser a pressão em hPa, seguido das velocidades nas direções x e y, respectivamente. O “time step” dos dados de entrada do vento não

precisa ser o mesmo da simulação hidrodinâmica. Uma interpolação linear será aplicada nos casos de “time step” diferentes.

5.1.3 Condições de contorno – “Transfer Boundary”

O MIKE 21 HD resolve as equações diferenciais parciais que dão o fluxo horizontal. Estas equações necessitam das condições de contorno. Portanto, a definição das condições de contorno é a segunda tarefa mais importante no processo de modelagem, só ficando atrás da especificação da batimetria.

Direções de fluxo bem especificadas são mais importantes no fluxo de entrada (influxo) no modelo, e são menos importantes para os fluxos de saída. Isto porque alguns erros no influxo das bordas são transportados para dentro do modelo e podem causar instabilidade. Introduzir condições de contorno de bordas abertas em um modelo de diferenças finitas é uma tarefa muito complexa, assim como a implementação de diferentes soluções que podem ser aplicadas.

Quanto melhor definidas estiverem as condições de contorno, melhores serão os resultados e menores serão os problemas de instabilidade. Para a entrada de dados na borda é possível escolher entre as duas seguintes combinações:

- Especificar o nível d’água e a direção do fluxo. O nível d’água pode ser constante ou variável ao longo da borda. A variação temporal pode ser constante, senoidal ou dada por um arquivo de dados variáveis.
- Especificar o fluxo total, isto é a descarga, através da borda e a da direção do fluxo. O fluxo total pode ser constante no tempo, ter uma variação senoidal ou variação especificada pelo arquivo de dados.

Deve-se especificar a variação temporal e espacial do fluxo ou do nível d’água através de uma das seguintes formas:

- Usar um valor constante em todos os pontos da grade.
- Adotar uma variação senoidal durante o período de simulação, por exemplo, uma variação de maré pode ser especificada. O mesmo valor é usado para todos os pontos ao longo da borda.

- Usar um arquivo de dados que forneça um valor constante ao longo da borda, mas variável no tempo.
- Definir a variação temporal e espacial.
- Adotar condições de contorno obtidas a partir de uma simulação prévia, chamada transferência de borda (“transfer boundary”). Nesta simulação prévia a área deve conter a nova área a ser simulada e para a qual serão transferidas as condições de contorno.

Finalmente, o MIKE 21 permite três opções de controle para os dados de borda, a saber:

1. Para calcular o “fluxo ao longo da borda” (FAB) existem as seguintes possibilidades:

- **0**: o fluxo é assumido perpendicular a borda aberta, isto é FAB igual a zero;
- **1**: a direção do fluxo é obtida pela extrapolação do fluxo num ponto da grade dentro da borda, quando a direção for extrapolada o FAB pode ser calculado;
- **2**: a direção do fluxo para a borda é explicitamente dada. O FAB pode ser calculado.
- **12**: esta é a combinação 1 e 2. Quando a direção do fluxo está fora da borda, a opção 1 é escolhida, do contrário a opção 2 é escolhida.

2. Os dados da borda poderão ser modificados para acomodar um possível vento e/ou força de Coriolis ao longo da borda. Assim, se for especificado um nível d’água para a borda, pode-se assumir que não há uma variação espacial ao longo da borda. Esta opção não será habilitada quando os dados da borda forem dados de “transfer boundary”. Em certas situações pode-se especificar um nível d’água não horizontal desde que um nível d’água horizontal não esteja dando resultados realistas.

3. No “default” do programa a direção do influxo é perpendicular à borda. Se o fluxo na área a ser modelada não for perpendicular à borda, deverá ser

elaborado um arquivo de entrada especificando a direção de entrada do fluxo no modelo para cada ponto da grade ao longo da borda.

5.2 Princeton Ocean Model – POM

5.2.1 Considerações Iniciais

O modelo utilizado POM – Princeton Ocean Model foi criado por Allan Blumberg e Geoge Mellor em 1977 e posteriormente aprimorado por diversos pesquisadores, sua descrição completa encontra-se em Blumberg e Mellor (1987) apud Camargo (1998); Harari e Camargo (1998); Mellor (2004); SABESP (2006) entre outros.

Em linhas gerais, o modelo tem estrutura tridimensional, não linear, com as equações hidrodinâmicas escritas na forma de fluxo, sob as aproximações de Boussinesq e hidrostática. Este modelo permite a utilização de grades curvilíneas horizontais e tipo do “terrain following” (coordenadas σ) na vertical. No sistema de coordenadas σ, a coordenada z é escalonada de acordo com a profundidade da coluna d’água local.

Este modelo inclui fechamento turbulento para o cálculo dos coeficientes de mistura turbulenta vertical. O fechamento turbulento de 2ª ordem utiliza os resultados das equações da energia cinética turbulenta e da escala de comprimento de turbulência no cálculo dos coeficientes cinemáticos de viscosidade e de difusão turbulenta de calor e sal na vertical (Mellor & Yamada, 1982 apud SABESP, 2006). Com o fechamento turbulento de 2ª ordem, o modelo reproduz de maneira mais realística o perfil vertical da corrente, reproduzindo as camadas de Ekman de superfície e de fundo. Considera-se também na integração do modelo a separação dos modos externos e internos. Os modos, externo (barotrópico) e interno (baroclínico), usam intervalos de tempo diferenciados para integração das equações, visando principalmente eficiência numérica.

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 é determinada por procedimentos explícitos com a especificação dos termos de difusão vertical.

5.2.2 Características do Modelo

As principais características do POM são as seguintes (Harari e Camargo (1998); Camargo (1988); Mellor (2004)):

- é um modelo tridimensional, não-linear de diferenças finitas, com equações hidrodinâmicas completas escritas na forma de fluxo;
- adota as aproximações de Boussinesq e hidrostática; a solução na vertical é baseada em coordenadas sigma, que acompanham o relevo;
- considera a difusão horizontal como sendo do tipo Smagorinsky; considera um fechamento turbulento de 2ª ordem para os coeficientes de viscosidade e de difusão na vertical;
- a grade horizontal utiliza coordenadas curvilíneas e um esquema de diferenciação tipo “Arakawa C”;
- utiliza um esquema explicito de integração do tipo “leapfrog” que é centrado no tempo e no espaço;

O modelo apresenta dois intervalos de tempo distintos, um para o modo de oscilação externo e outro para o interno. O modo externo (barotrópico e bidimensional) usa um intervalo de tempo menor, baseado na condição de estabilidade computacional de Courant-Friedrichs-Levy (CFL). O modo interno (baroclinico e tridimensional) usa um intervalo de tempo mais longo (“spliting mode”).

Este modelo permite determinar a evolução temporal dos campos de elevação, temperatura, salinidade, densidade, corrente e transporte, a partir da especificação da batimetria, condições meteorológicas na superfície e condições oceanográficas nos contornos abertos. A seguir são apresentadas as equações básicas do modelo.

5.2.3 Equações Básicas

O modelo hidrodinâmico POM é baseado em uma formulação tridimensional prognóstica com aproximação hidrostática. As variáveis potencialmente prognósticas são: três componentes da velocidade (*u, v* e *w*), temperatura (*T*), salinidade (*S*), energia cinética turbulenta ($q^2/2$), escala turbulenta (*l*) e elevação da superfície (η).

Considera-se um sistema de coordenadas cartesianas ortogonais, com *x* crescendo para Leste, *y* para Norte, no qual as coordenadas horizontais (i.e., *x, y*) referem-se ao espaço computacional.

A superfície livre está localizada em $z = \eta(x, y, t)$ e o fundo em $z = -H(x, y)$. Neste sistema as equações de conservação e a equação de estado são escritas como:

Equação da continuidade:

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0 \qquad (10)$$

Equação de Reynolds para conservação de momento:

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}-fv=-\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial P}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_M\frac{\partial u}{\partial z}\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(2A_M\frac{\partial u}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left[A_M\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)\right] \qquad (11)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}+fu=-\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial P}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_M\frac{\partial v}{\partial z}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(2A_M\frac{\partial v}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left[A_M\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)\right] \quad (12)$$

As equações de conservação de temperatura potencial e salinidade são dadas, respectivamente, por:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t}+u\frac{\partial \Theta}{\partial x}+v\frac{\partial \Theta}{\partial y}+w\frac{\partial \Theta}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial z}\left(K_H\frac{\partial S}{\partial z}\right)+F_H \quad (13)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t}+u\frac{\partial S}{\partial x}+v\frac{\partial S}{\partial y}+w\frac{\partial S}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial z}\left(K_H\frac{\partial S}{\partial z}\right)+F_S \quad (14)$$

Onde Θ é a temperatura potencial, ou temperatura *in situ* para aplicações em águas rasas (ºC), e S é salinidade (PSU).

Dadas a temperatura potencial e a salinidade, a densidade é calculada por uma equação de estado:

$$\rho=\rho(\Theta,S) \quad (15)$$

O modelo de fechamento de turbulência de segunda ordem adiciona mais duas equações ao conjunto básico, equações estas que descrevem a evolução de q^2 e q^2l, apresentadas a seguir:

Equação da energia cinética turbulenta:

$$\frac{\partial q^2}{\partial t} + u\frac{\partial q^2}{\partial x} + v\frac{\partial q^2}{\partial y} + w\frac{\partial q^2}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z}\left(K_q \frac{\partial q^2}{\partial z} \right) + 2K_M \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{2g}{\rho_0} K_H \frac{\partial \rho}{\partial z} - \frac{2q^3}{B_1 l} + F_{q^2} \quad (16)$$

Equação da turbulência em macro-escala:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(q^2 l\right) + u\frac{\partial}{\partial x}\left(q^2 l\right) + v\frac{\partial}{\partial y}\left(q^2 l\right) + w\frac{\partial}{\partial z}(2q^2 l) = \frac{\partial}{\partial z}\left(K_q \frac{\partial}{\partial z}\left(q^2 l\right) \right) + lE_1 K_M \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{lE_1 g}{\rho_0} K_H \frac{\partial \rho}{\partial z} - \frac{q^3}{B_1}\tilde{W} + F_{q^2 l} \quad (17)$$

onde

u,v,w = componente do vetor velocidade (m/s);

f = parâmetro de Coriolis (s^{-1});

ρ_0 = densidade de referência (kg/m^3);

ρ = densidade in situ (kg/m^3);

P = pressão (N/m^2);

K_M = coeficiente cinemático vertical de viscosidade turbulenta (m^2/s);

K_H = coeficiente cinemático vertical de difusão turbulenta de calor e sal (m^2/s);

g = aceleração da gravidade (m/s^2);

Θ = temperatura potencial (ºC);

S = salinidade (psu);

A_M = coeficiente cinemático horizontal de viscosidade turbulenta (m^2/s);

A_H = coeficiente cinemático horizontal de difusão turbulenta de calor e sal (m^2/s);

$\widetilde{W}$ = função proximidade-do-contorno;

q^2 = energia cinética turbulenta;

k = constante de von Karman (k = 0,4);

5.3 Delft3D

5.3.1 Considerações iniciais

O modelo hidrodinâmico Delft3D foi desenvolvido pela WL-Delft Hydraulics, instituto de pesquisa da Holanda, sendo um conjunto de programas capaz de simular escoamentos em corpos d'água superficiais. Tem uma estrutura flexível que simula fluxos em duas ou três dimensões, assim como ondas, qualidade da água, ecologia, transporte de sedimento e morfologia do fundo, sendo também capaz de conduzir à interação entre estes processos. Possui uma interface amigável que permite toda a editoração, simulação e visualização de projetos e cenários.

O Sistema de Modelagem Delft3D é composto por diversos módulos que possuem ferramentas de pré-processamento, processamento e pós-processamento, o que facilita o trabalho de implementação do modelo para uma região específica. O sistema compreende os seguintes módulos: Hidrodinâmico (FLOW); Ondas (WAVE); Transporte de sedimentos (SED); Morfologia (MOR); Qualidade de água (WAQ); Traçadores (PART); Ecologia (ECO) e Química (CHEM).

O Delft3D é um modelo numérico baseado em diferenças finitas e adota um sistema de grade chamado "staggered grid". As variáveis que descrevem o fluxo, nível d'água e as componentes de velocidade (u, v, w), são distribuídas numa grade Arakawa Tipo C. Nesta grade os pontos de elevação (pontos de pressão) estão definidos no centro da célula e as componentes da velocidade são perpendiculares aos lados da grade.

O módulo hidrodinâmico do Delft3D, o Delft3D-FLOW, é capaz de simular fluxos não estacionários em duas ou três dimensões, fenômenos de transporte resultantes de maré, descargas de água e efeitos meteorológicos, incluindo o efeito de diferença de densidade devido a gradientes horizontais dos campos de temperatura e

salinidade. O módulo hidrodinâmico pode ser usado para efetuar simulações de fluxo em mares e oceanos, regiões costeiras, estuários, reservatórios e rios.

As condições hidrodinâmicas (velocidade, níveis, densidade, salinidade, etc.) calculadas pelo módulo Delft3D-Flow são usadas como dados de entrada para outros módulos do Delft 3D.

5.3.2 Características do Modelo – Delft3D-FLOW

O sistema de equações consiste de equações horizontais do movimento, da continuidade e do transporte para constituintes conservativos. As equações são formuladas em coordenadas curvilíneas ortogonais ou em coordenadas esféricas. No Delft3D-FLOW, modelos com grade retangular (estrutura cartesiana de referência) são considerados uma forma simplificada da grade curvilínea. Em coordenadas curvilíneas, a superfície livre e a batimetria são relacionadas para um plano horizontal de referência, enquanto que em coordenadas esféricas o plano de referência segue a curvatura da Terra.

O fluxo é forçado pela maré nas bordas abertas, tensão de cisalhamento do vento na superfície, gradiente de pressão devido à inclinação da superfície livre (campo barotrópico), por gradientes horizontais de densidade (campo baroclínico) e por correntes.

O modelo Delft3D-FLOW leva em conta em sua formulação matemática os seguintes fenômenos físicos:

- Gradientes de superfície livre (efeitos barotrópicos).
- Efeitos de rotação da Terra (força de Coriolis).
- Variabilidade da densidade da água.
- Gradiente de densidade horizontal (efeitos baroclinico).
- Inclusão de gradientes de pressão nas equações de momentum (correntes de densidade)
- Advecção-difusão incluída nos cálculos, como por exemplo a inclusão de gradientes de densidades (devidos à não uniformidade da temperatura e distribuição da salinidade)
- Fluxos turbulentos de massa e momento (modelos de fechamento turbulento);

- Transporte de substâncias conservativas (sal, calor, etc).
- Maré forçando as bordas abertas.
- Variação espacial e temporal do atrito do vento na superfície da água.
- Variação espacial da tensão de atrito de fundo.
- Variação espacial e temporal da pressão atmosférica na superfície da água.
- Variação temporal nas fontes e sumidouros (ex: nas vazões de rios).
- Inundação e esgotamento da maré baixa.
- Troca de calor através da superfície livre.
- Evaporação e transpiração.
- Efeito do fluxo secundário sobre as equações de momento na média da profundidade.
- Vazão afluente e efluente (ex. descarga de rios).
- Difusão de momento na direção vertical devido a ondas internas.
- Influência das ondas sobre atrito de fundo (2D e 3D).
- Fluxo através de estruturas hidráulicas.
- Fluxos de vento incluído ciclone, furacão e tufão.
- Simulações de descargas térmicas, descarga de efluente e tomada de água em qualquer localização e em qualquer profundidade da área modelada (módulo advecção/difusão)
- Cálculo de trajetórias.
- Simulações que contabilizam as inundações e vazantes em planícies de maré (contornos móveis) para casos 2D e 3D.

5.3.3 Equações Hidrodinâmicas Governantes

O Delft3D-FLOW resolve equações de Navier Stokes para fluídos incompressíveis levando em conta a aproximação de águas rasas e Boussinesq. Na componente vertical da equação do momento, a aceleração vertical é desprezada. Em modelos 3D as velocidades verticais são computadas a partir da equação da continuidade. Um conjunto de equações diferenciais parciais em combinação com apropriadas condições iniciais e de contorno são discretizadas utilizando o esquema de diferenças finitas.

Na horizontal o Delft3D-FLOW usa coordenadas curvilíneas ortogonais e o sistema suporta dois sistemas distintos de coordenadas: coordenadas cartesianas (ξ, η) e coordenadas esféricas (λ, ϕ).

Coordenadas esféricas são um caso especial de coordenadas curvilíneas ortogonais com:

$$\begin{aligned} &\xi = \lambda, \\ &\eta = \phi, \\ &\sqrt{G_{\xi\xi}} = R\cos\phi, \\ &\sqrt{G_{\xi\xi}} = R \end{aligned} \qquad (18)$$

onde λ é longitude, ϕ é latitude e R é raio da Terra (6.370 km, WGS84).

No Delft3D-FLOW as equações são formuladas em coordenadas curvilíneas ortogonais. A escala de velocidade está no espaço físico, mas os componentes são perpendiculares à fase das células da grade curvilínea. A transformação da grade introduz termos de curvatura nas equações do momento.

Na vertical o Delft3D-FLOW oferece dois diferentes sistemas de grades: um chamando de sistema de coordenada σ (σ-grid) para modelos do oceano e o sistema de coordenadas Cartesianas Z (Z-grid). As equações hidroninâmicas descritas a seguir são válidas para o sistema de coordenadas σ. As equações para o sistema de coordenadas Z são similares.

O sistema de coordenada σ é definido como:

$$\sigma = \frac{z-\zeta}{d+\zeta} = \frac{z-\zeta}{H}, \qquad (19)$$

Onde:

z = coordenada vertical

ζ = elevação da superfície livre acima do plano de referência

d = profundidade abaixo do plano de referência

H = profundidade total da água dada por:

$$H = d + \zeta \qquad (20)$$

Em áreas costeiras, estuários e lagos podem ocorrer fluxos estratificados em combinação com topografia íngreme. Embora o σ-grid tenha uma borda ajustada (na vertical) poderá nem sempre ter resolução suficiente em torno da picnoclina. A linha da coordenada intersecciona a interface da densidade que pode dar erros significativos na aproximação do gradiente de densidade horizontal. Portanto, recentemente um segundo sistema de coordenadas vertical, baseado em coordenadas cartesianas (Z-grid) foi introduzido no Delft3D-FLOW para simulações em 3D de sistema fracamente estratificados.

Na figura a seguir pode-se ver um exemplo com a diferença entre os dois sistemas.

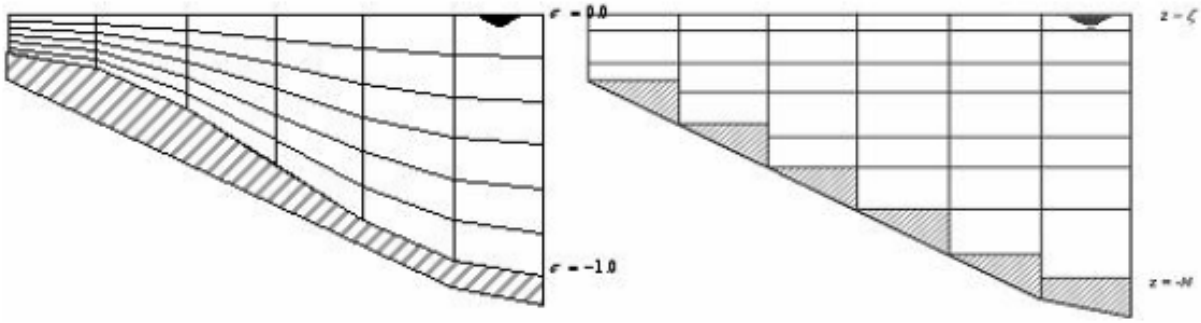


Figura 8 – Exemplo de σ-grid (à esquerda) e Z-grid (à direta)

A equação da continuidade verticalmente integrada é representada por:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \left[(d+\zeta) U \sqrt{G_{\eta\eta}}\right]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \left[(d+\zeta) V \sqrt{G_{\xi\xi}}\right]}{\partial \eta} = Q \qquad (21)$$

Com Q representando as contribuições, por unidade de área, das vazões de entrada e de saída, da precipitação e da evaporação:

$$Q = H \int_{-1}^{0} \left(q_{entrada} - q_{saída} \right) d\sigma + P - E \qquad (22)$$

Onde:

$q_{entrada}$ = vazão de entrada

$q_{saída}$ = vazão de saída

P = precipitação

E = evaporação

As equações de conservação de quantidade do movimento nas direções ξ e η podem ser dadas por:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}}\frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d+\zeta}\frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - fv =$$

$$-\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_\xi + F_\xi + \frac{1}{(d+\zeta)^2}\frac{\partial}{\partial \sigma}\left(K_v \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_\xi \qquad (23)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}}\frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d+\zeta}\frac{\partial v}{\partial \sigma} - \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - fu =$$

$$-\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_\eta + F_\eta + \frac{1}{(d+\zeta)^2}\frac{\partial}{\partial \sigma}\left(K_v \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_\eta \qquad (24)$$

As variações da densidade são negligenciadas, exceto nos termos de pressão baroclínica, P_ξ e P_η representam o gradiente de pressão. As forças F_ξ e F_η indicam a força dissipativa de energia devido à viscosidade no plano horizontal (tensões de Reynold's). M_ξ e M_η representam fontes e sorvedouros de momentum devido à eventuais obstruções ou contribuições ao movimento (forças promovidas por descarga de rios, ondas, estruturas hidráulicas etc.). O termo K_v representa o coeficiente cinemático vertical de viscosidade turbulento.

A velocidade vertical ω, referente à superfície sigma-σ, é obtida adaptando a componente vertical σ da equação do momento com a equação da continuidade:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t}+\frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial\left[(d+\zeta)u\sqrt{G_{\eta\eta}}\right]}{\partial \xi}+\frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial\left[(d+\zeta)v\sqrt{G_{\xi\xi}}\right]}{\partial \eta}+\frac{\partial \omega}{\partial \sigma}=H\left(q_{entrada}-q_{saida}\right) \quad (25)$$

Os efeitos da precipitação e evaporação são levados em conta pelos termos $q_{entrada}$ e $q_{saída}$. A coordenada vertical ω é relacionada ao movimento das iso-superfícies de σ. A coordenada vertical de velocidade no sistema cartesiano é calculada através das velocidades horizontais, das oscilações do nível e da velocidade ω de acordo com a equação.

$$w=\omega+\frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}}\left[u\sqrt{G_{\eta\eta}}\left(\sigma\frac{\partial H}{\partial \xi}+\frac{\partial \zeta}{\partial \xi}\right)+v\sqrt{G_{\xi\xi}}\left(\sigma\frac{\partial H}{\partial \eta}+\frac{\partial \zeta}{\partial \eta}\right)\right]+\left(\sigma\frac{\partial H}{\partial t}+\frac{\partial \zeta}{\partial t}\right) \quad (26)$$

Considerando a aproximação de águas rasas, a componente vertical da equação do momento se reduz à equação fundamental do Equilíbrio Hidrostático. Não são levadas em consideração as acelerações verticais devido à flutuabilidade e devido às variações abruptas do campo batimétrico. Assim:

$$\frac{\partial P}{\partial \sigma}=-\rho\, g\, H \quad (27)$$

Integrando, a pressão hidrostática pode ser escrita como:

$$P=P_{atm}+g\, H\int_{\sigma}^{0}\rho\left(\xi,\zeta,\sigma',t\right)d\sigma' \quad (28)$$

Considerando uma massa de água com densidade uniforme e, levando-se em conta a pressão atmosférica, o gradiente de pressão e dados por:

$$\frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\xi\xi}}}P_\xi = \frac{g}{\sqrt{G_{\xi\xi}}}\frac{\partial\zeta}{\partial\xi} + \frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\xi\xi}}}\frac{\partial P_{atm}}{\partial\xi}, \quad (29)$$

$$\frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\eta\eta}}}P_\eta = \frac{g}{\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial\zeta}{\partial\eta} + \frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial P_{atm}}{\partial\eta}. \quad (30)$$

O gradiente de pressão devido à inclinação da superfície do mar é conhecido como gradiente de pressão barotrópico. A pressão atmosférica é incluída no sistema para permitir simulações de tempestades, sendo, nestas simulações, importante considerar a variação espaço-temporal do vento e campos de pressão. Para massas de água que apresentem campo de densidade variado, a densidade local é relacionada aos valores de temperatura e salinidade através da equação do estado. Nessas condições a equação para gradientes horizontais de pressão pode ser escrita como:

$$\frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\xi\xi}}}P_\xi = \frac{g}{\sqrt{G_{\xi\xi}}}\frac{\partial\zeta}{\partial\xi} + g\frac{d+\zeta}{\rho_0\sqrt{G_{\xi\xi}}}\int_\sigma^0\left(\frac{\partial\rho}{\partial\xi} + \frac{\partial\rho}{\partial\sigma}\frac{\partial\sigma}{\partial\xi}\right)d\sigma', \quad (31)$$

$$\frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\eta\eta}}}P_\eta = \frac{g}{\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial\zeta}{\partial\eta} + g\frac{d+\zeta}{\rho_0\sqrt{G_{\eta\eta}}}\int_\sigma^0\left(\frac{\partial\rho}{\partial\eta} + \frac{\partial\rho}{\partial\sigma}\frac{\partial\sigma}{\partial\eta}\right)d\sigma', \quad (32)$$

O primeiro termo do lado direito das equações (31) e (32) representa o gradiente de pressão barotrópico (sem gradientes de pressão atmosférica) e o segundo termo o gradiente de pressão baroclínico. Para evitar fluxos artificiais, a aproximação numérica do termo baroclínico requer pequenos erros de truncamento e por isso um esquema numérico especial. Para evitar esse tipo de problema, a

discretização do Delft3D-FLOW segue o esquema proposto por Stelline e Van Kester (1994) apud Delft3D-FLOW, 2006.

As forças F_ξ e F_η que aparecem na equação de conservação da quantidade de movimento - Equações (23) e (24) - representam os tensores de cisalhamento horizontais de Reynolds. Esses tensores são determinados usando o conceito de viscosidade turbulenta ("eddy viscosity") (ROID, 1984 apud DELFT3D-FLOW, 2006). Esse conceito expressa as componentes do tensor de cisalhamento como sendo o produto entre um coeficiente de viscosidade turbulenta e as correspondentes médias do tensor de deformação.

Em um fluxo tri-dimensional o tensor de cisalhamento é anisotrópico. O coeficiente de viscosidade horizontal υ_H é muito maior que o componente de viscosidade turbulenta na vertical. O coeficiente de viscosidade turbulento horizontal é composto por três partes: uma parte devido à turbulência bi-dimensional, uma parte devido à turbulência tri-dimensional e uma parte devido à viscosidade molecular. A parte bi-dimensional υ_{2D} é associada às contribuições dos movimentos horizontais que não são resolvidas devido à resolução espacial da grade (médias de Reynolds). A parte tri-dimensional υ_{3D} é conhecida como viscosidade turbulenta tri-dimensional e é estimada segundo um modelo de fechamento turbulento. A viscosidade molecular é representada por υ_{mol}. Dentro do Delft3D-FLOW o coeficiente de viscosidade turbulenta υ_H é definido por:

$$\upsilon_H = \upsilon_{2D} + \upsilon_V = \upsilon_{2D} + \upsilon_{3D} + \upsilon_{mol} \qquad (33)$$

Onde υ_H é o coeficiente de viscosidade vertical.

Os tensores de cisalhamento horizontais de Reynolds, F_ξ e F_η, são definidos como:

$$F_{\xi} = \frac{1}{G_{\xi\xi}} \frac{\partial \tau_{\xi\xi}}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\zeta\zeta}}} \frac{\partial \tau_{\xi\zeta}}{\partial \zeta} \quad (34)$$

$$F_{\zeta} = \frac{1}{G_{\xi\xi}} \frac{\partial \tau_{\zeta\xi}}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\zeta\zeta}}} \frac{\partial \tau_{\zeta\zeta}}{\partial \zeta} \quad (35)$$

Para pequenas escalas, onde a tensão de cisalhamento está próxima aos contornos, tem-se:

$$\tau_{\xi\xi} = \frac{2\upsilon_H}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \left(\frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{\partial u}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \xi} \right), \quad (36)$$

$$\tau_{\xi\eta} = \tau_{\eta\xi} = \upsilon_H \left\{ \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left(\frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\partial u}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \eta} \right) + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \left(\frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{\partial u}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \xi} \right), \right. \quad (37)$$

$$\tau_{\eta\eta} = \frac{2\upsilon_H}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left(\frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\partial v}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \eta} \right). \quad (38)$$

5.3.4 Condições de Contorno

O problema de especificação das condições de contorno das bordas laterais é que certo nível d'água ou uma distribuição de velocidade irá se desenvolver cruzando a borda, isto devido à combinação de processos no domínio do modelo. Para uma correta especificação das condições de contorno, sua distribuição deve ser conhecida de antemão, caso contrário poderão ser desenvolvidos distúrbios nas bordas. Existem dois caminhos para resolver este problema. O primeiro é tentar

prever a configuração do nível d'água ou a velocidade da corrente ao longo da borda aberta lateral, através da resolução de um modelo 1D ou 2D, e então impor esta condição. Para casos simples isto é possível, mas para combinações mais complexas de condições forçantes isto é complicado e lento.

De acordo com Roelvink & Walstra (2004), a melhor opção é deixar o modelo determinar a solução correta para a borda aberta lateral através da imposição de um gradiente para o nível d'água ao longo da borda (uma então chamada condição de contorno Neumann) ao invés de fixar o nível d'água ou a velocidade da corrente.

Em muitos casos o gradiente pode ser assumido como zero; apenas nos casos de maré ou em casos onde uma onda viaja ao longo da costa. O gradiente do nível d'água ao longo da costa pode ser assumido como zero no caso onde os campos de vento e de onda não são variáveis, ou variam periodicamente com a onda de maré. Em último caso, o gradiente pode variar no tempo. A condição de contorno Neumann pode ser aplicada apenas nas bordas laterais (perpendiculares à costa) em combinação com a variação do nível d'água na borda paralela à costa, situação necessária para fazer valer a solução matemática nas bordas.

5.3.5 Definindo as condições de contorno com as bordas Neumann

Considerando o exemplo a seguir que descreve uma pequena região costeira com uma onda de maré atravessando ao longo da costa. Nas bordas laterais (seção A-A', B-B', Figura 9), o gradiente do nível d'água em função do tempo é chamado Condição de Contorno Neumann e, será imposto: $\frac{\partial \zeta}{\partial x} = f(t)$.

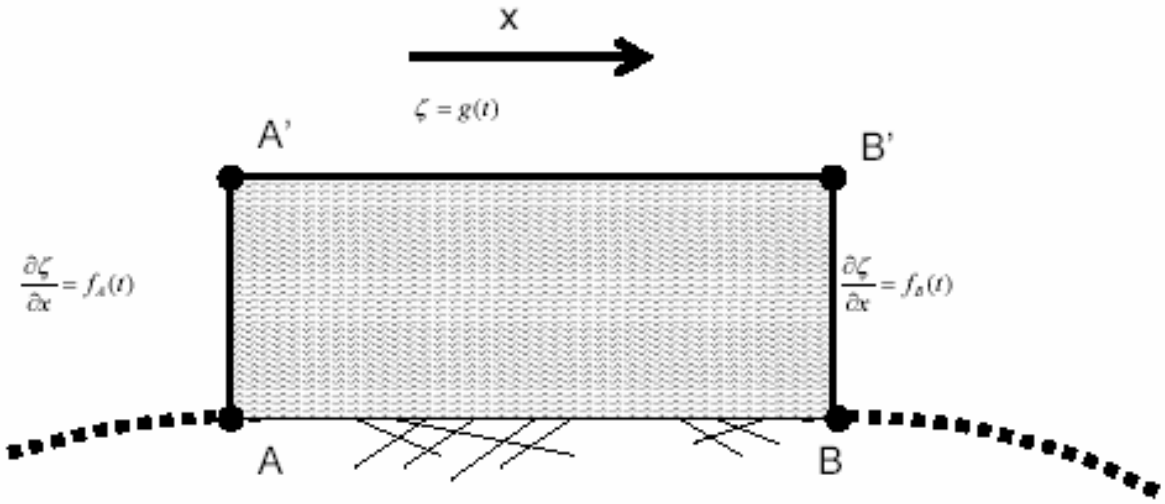


Figura 9 – Esquemático de um modelo hidrodinâmico de área costeira com três bordas abertas

A borda A'-B' é forçada por uma onda progressiva harmônica / astronômica dada por:

$$\zeta = \sum_{j=1}^{N} \zeta_j \cos\left(\omega_j t - k_j x\right) = N \sum_{j=1} \zeta \cos\left(\omega_j t - \varphi_j\right) \qquad (39)$$

Onde:

ζ_j = amplitude (m); ω_j = freqüência (radianos/hora) = $\frac{2\pi}{T_j(hr)}$; k_j = número de onda = $\frac{2\pi}{L_j}$; A diferença de fase (φ_j) entre o ponto A e B é dado por $k_j d_{AB} = \frac{2\pi}{L_j} d_{AB}$ (em graus multiplica-se por $\frac{\pi}{180}$), sendo d_{AB} a distância entre o ponto A e B. L_j é o comprimento de onda de maré $L_j = \frac{2\pi}{\omega_j} c_j$, com c_j a velocidade da onda de maré.

Para água superficial a velocidade é independente da componente e é dada por $\sqrt{gH}$ com H uma característica da profundidade.

Para forçar as duas bordas laterais é usado um gradiente (Neumann) como condição de contorno. O termo forçante f(t) é referido à forçante ao largo pela relação:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial x} = \sum_{j=1}^{N} k_j \zeta_j \sin\left(\omega_j t - k_j x\right) = \sum_{j=1} k_j \zeta \cos\left(\omega_j t - \left(\varphi_j + \frac{\pi}{2}\right)\right) \quad (40)$$

Na Tabela 4 é especificada as relações entre a forçante de maré

Tabela 4 – Freqüências, fases e amplitudes ao longo da Bordas paralela à linha de costa e correspondentes freqüências, fases e amplitudes para as Bordas Neumann – Delft3D

Parâmetro	Borda A'-B'	Bordas Neumann A-A', B-B'
Freqüência (º/hora)	$\omega_j (A) = \omega_j (B)$	$\omega_j (A) = \omega_j (A') = \omega_j (B) = \omega_j (B')$
Fase (º)	$\varphi_j (A) = 0°$ $\varphi_j (B) = \varphi_j$	$\varphi_j (A) = \varphi_j (A') = \pi/2 (+90)$ $\varphi_j (B) = \varphi_j (B') = \pi/2 (+90) + \varphi_j$
Amplitude (m) (m/m)	$\zeta_j (A) = \zeta_j (B)$	$\left(\frac{\partial \zeta}{\partial x}\right)_j (A) = \left(\frac{\partial \zeta}{\partial x}\right)_j (A') = \frac{2\pi\zeta_j}{L_j}$ $\left(\frac{\partial \zeta}{\partial x}\right)_j (B) = \left(\frac{\partial \zeta}{\partial x}\right)_j (B') = \frac{2\pi\zeta_j}{L_j}$

5.4 CORMIX

5.4.1 Descrição do Modelo

O CORMIX (Cornell Mixing Zone Expert System) é um sistema de análise, previsão e projeto de lançamento de efluentes em diferentes corpos d'água. Foi desenvolvido sob um acordo de financiamento entre a U.S.EPA e a Universidade de Cornell durante o período de 1985-1995. Embora a ênfase do sistema se dê na previsão da geometria e das características de diluição na zona de mistura inicial, o sistema também fornece a previsão do comportamento da pluma de descarga. O sistema é baseado em escalas de comprimento que agrega vários módulos contendo diversos modelos hidráulicos que descrevem uma variedade bastante grande de comportamento de plumas.

O Sistema Especialista CORMIX consiste de três subsistemas:

- CORMIX 1, utilizado para análise de descargas pontuais abaixo da superfície;
- CORMIX 2, utilizado para a análise de múltiplos lançamentos através de difusores; e
- CORMIX 3, utilizado para análise de lançamentos superficiais.

No presente trabalho está sendo usado o CORMIX 2 que é um programa computacional desenvolvido para simular descargas por difusores submersos com multibocais. O programa dispõe de uma ampla gama de possibilidades de variações geométricas, podendo atender em torno de 80% dos casos reais de configurações de difusores.

O Sistema Especialista a ser utilizado apresenta algumas hipóteses e simplificações que, na realidade fazem parte em maior ou menor grau, de qualquer software que tente simular uma situação real do comportamento dinâmico do meio ambiente. Desta forma, algumas considerações no âmbito do software utilizado devem ser colocadas:

- *Perfis de densidade*: existem quatro tipos de perfis disponíveis no modelo. Para o presente caso, os perfis considerados na simulação são o uniforme e o linear;
- *Corrente*: embora alguns estudos apresentem dados de corrente em várias camadas da coluna d'água, a simulação só pode ser feita com um único dado de corrente. A corrente é assumida como velocidade constante e retilínea durante toda a fase primária e secundária.

As variáveis dinâmicas globais importantes para os difusores multibocais são o "fluxo de quantidade de movimento" (M_0) e o "fluxo de empuxo" (J_0). Considerando que o "fluxo de quantidade de movimento" M_0 é uma grandeza direcionada (vetor), os ângulos de descarga têm grande influência em seu comportamento dinâmico.

Conforme Fortis (2005), quanto às escalas de comprimento, dentro de uma unidade de comprimento do elemento difusor bidimensional (L_D), as variáveis de fluxo (por unidade de comprimento) são:

Fluxo de quantidade de movimento:

$$m_0 = \frac{M_0}{L_D} \qquad (41)$$

Sendo: $M_0 = v_j * Q_0$, onde: v_j = velocidade do lançamento, Q_0 = vazão do efluente e L_D = comprimento do elemento difusor.

Fluxo de empuxo:

$$j_0 = \frac{J_0}{L_D} \qquad (42)$$

Sendo: $J_0 = g'_0 * Q_0$, onde: $g'_0 = g\left(\frac{\rho_a - \rho_e}{\rho_e}\right)$; ρ_a = densidade da água do mar, e ρ_e = densidade do efluente.

Fluxo do volume:

$$q_0 = \frac{Q_0}{L_D} \qquad (43)$$

Sendo: $Q_0 = v_j * a_0$, onde a_0 = área do orifício de saída.

O difusor é uma parte extremamente importante do emissário, pois a diluição inicial possui uma dependência direta com a sua forma, constituição e orientação. Segundo SABESP (2005b) a diluição inicial é uma das poucas variáveis sobre a qual é possível interferir significativamente, pois as diluições subseqüentes devido aos processos de dispersão horizontal e decaimento bacteriano são fortemente influenciadas por fatores oceanográficos e climatológicos sobre os quais não é possível exercer um controle, exceto na definição do comprimento do emissário.

No caso do módulo CORMIX 2, os resultados no campo próximo permitem avaliar a eficiência de diluição de uma alternativa de sistema difusor, neste sentido é uma ferramenta importante como suporte inicial na tomada de decisão.

Para a classificação de fluxos, no campo próximo, na aplicação do modelo CORMIX 2 são identificadas 32 classes de fluxo (FORTIS, 2005), as três principais categorias de classes de fluxo são:

- Classe MS: fluxo afetado pela estratificação linear conduzindo ao confinamento interno;
- Classe MU: fluxo com empuxo positivo em camada de ambiente uniforme; e
- Classe MNU: fluxo com empuxo negativo em camada de ambiente uniforme.

6 METODOLOGIA

6.1 Estruturação da Tese

Após estabelecer os objetivos e as devidas justificativas para o desenvolvimento do tema, a Tese foi elaborada cumprindo-se algumas etapas de trabalho, descritas a seguir:

- Elaboração da revisão da bibliografia, na qual procurou-se apresentar conceitos referentes à modelagem matemática. Em paralelo procurou-se apresentar estudos anteriores que pudessem contribuir para o estudo em tela.
- Os dados de medição de campo foram compilados, analisados e feita a verificação de seu aproveitamento. Na seqüência, passou-se para a fase de elaboração de planilhas e gráficos dos dados que permitiram a sua visualização temporal e espacial. Foram efetuadas análises que permitiram obter conclusões a respeito da área na qual foram elaboradas as medições. Para isto, foram utilizadas além dos dados de medição, as análises dos estudos aos quais os dados se referem. Os dados analisados e consistidos foram utilizados para alimentar os modelos matemáticos, assim como utilizados para a comparação e análise de aderência com os resultados da modelagem matemática.
- Escolha dos modelos a serem aplicados da região de estudo. Nesta etapa, a escolha foi influenciada pela disponibilidade e oportunidade de utilização dos modelos. Assim, ficou determinada a utilização dos seguintes modelos: o MIKE 21, modelo utilizado no Laboratório de Hidráulica da USP, que possui licença educacional e está disponível para a utilização acadêmica; o POM que é amplamente utilizado no Instituto Oceanográfico da USP e mundialmente reconhecido, além de ter sua versão livre para o uso; o Delft3D que pode ser utilizado a partir de convênio de cooperação entre a USP e o UNESCO-IHE, na Holanda, onde houve a possibilidade de um estágio no exterior para o treinamento e uso do modelo. O CORMIX v5.0 foi utilizado por ser um software gratuito e disponibilizado pela USEPA.

- Estudo dos modelos matemáticos utilizados na elaboração da Tese. Procurou-se apresentar descrição geral dos programas, assim como suas equações governantes e características relevantes para a aplicação em questão. Cabe lembrar que, não houve a intenção de aprofundar-se em conhecimentos da formulação ou métodos de resolução dos modelos. A visão do autor é de usuário dos programas e procurou analisá-los em função dos resultados e das características práticas de cada modelo utilizado.
- Implementação do modelo MIKE 21 com os processos de inicialização, validação e avaliação dos resultados da modelagem.
- Implementação do modelo Delft3D com os processos de inicialização, calibração, validação e avaliação dos resultados da modelagem.
- Avaliação dos resultados fornecidos pelo modelo POM. Nesta etapa não foi possível a utilização propriamente dita do modelo. O mesmo já se encontra implementado no Instituto Oceanográfico e num acordo com o professor Dr. Joseph Harari foi possível analisar os resultados para os períodos e pontos de interesse desta Tese.
- Com os resultados dos modelos POM e Delft3D e as medições de campo, foram escolhidos os cenários de avaliação para a utilização do modelo CORMIX. Foram efetuadas a simulações com o CORMIX para o emissário de Santos / São Vicente.
- Na análise dos resultados foi feita uma análise crítica dos modelos hidrodinâmicos utilizados. Foi discutida e avaliada a dispersão de efluentes leves no litoral da Baixada Santista.

Nos processos de calibração e validação dos modelos foram comparados os resultados fornecidos pelo modelo com os dados de medição de campo. A calibração do modelo é um processo recursivo, no qual se efetua uma entrada de dados conhecida e confiável (como por exemplo: batimetria, variação da maré e vento, etc.) e utilizando-se parâmetros de calibração, que são ajustáveis no decorrer dos vários processamentos que se fizerem necessários, obtêm-se resultados de simulações que devem ser comparados às medições de campo. O modelo é dado

como calibrado quando no decorrer da série de processamentos atinge-se resultados nos quais os valores são os mais próximos possíveis dos valores medidos em campo. Para isto é necessário eleger parâmetros de calibração que podem ser, por exemplo, rugosidade do fundo, coeficiente de atrito do vento, viscosidade, densidade, condição de contorno, ou qualquer outro parâmetro que o programa tenha disponível como parâmetro de calibração. Após uma análise, e se necessário, após uma análise de sensibilidade, são determinados os parâmetros a serem utilizados nos processamentos subseqüentes. Após a calibração, o modelo deve ser validado, ou seja, devem ser utilizados os mesmos parâmetros de calibração, a mesma grade batimétrica, o mesmo tipo de dados de entrada e deve ser processado para outro período e se possível para outro ponto dentro da grade batimétrica, para qual se tenham dados coletados em campo para as comparações. Esta validação pode ser efetuada para vários outros períodos, desde que existam dados medidos em campo para a comparação. A validação é importante, pois em períodos distintos (por exemplo: inverno e verão) e locais diferentes da grade os parâmetros utilizados na primeira calibração podem requerer ajustes, ou simplesmente a validação dará confiabilidade da calibração efetuada.

Os parâmetros de calibração alterados ao longo desta etapa estão relacionados para cada modelo no capítulo de Resultados. O ajuste destes parâmetros teve o objetivo de melhorar os resultados dos processamentos dos modelos. Para estabelecer a comparação entre os resultados de corrente e maré foram feitos gráficos de evolução ao longo do tempo. Por fim, para estabelecer os parâmetros de correlação foi utilizada a seguinte metodologia:

- Estimativa gráfica do coeficiente de correlação colocando-se nos eixos coordenados os valores de modelo versus os valores de medição de campo. Assim, é elaborado o Diagrama de Dispersão dos dados, onde é traçada a linha de tendência de regressão linear com intersecção em zero. São dados a equação da reta e o R-quadrado, que corresponde ao valor de coeficiente de correlação.

No intuito de atender os objetivos pré-estabelecidos, a tese foi estruturada da seguinte forma:

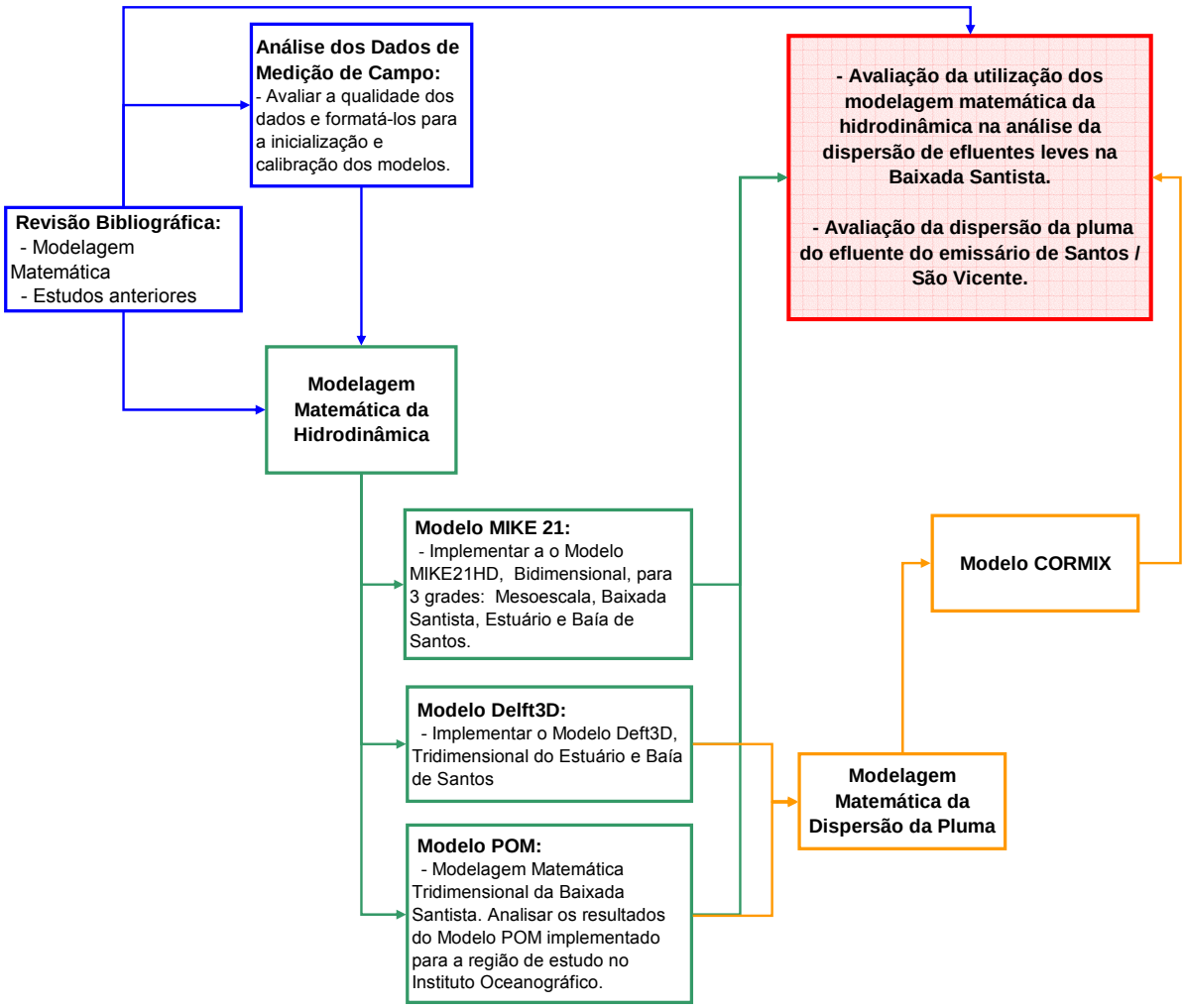


Figura 10 – Estruturação da Tese

6.2 Metodologia Empregada na Modelagem matemática

Na modelagem matemática foi escolhido utilizar o modelo MIKE 21, disponível no Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica. Este modelo foi utilizado em Baptistelli (2003) e um dos objetivos da Tese foi o de implementar ferramentas do modelo que até então não haviam sido utilizadas pela autora. Entendeu-se que o uso do modelo tridimensional seria interessante para o estudo do Estuário e Baia de Santos, então se optou por incorporar à discussão da Tese o modelo POM, já implementado e calibrado no Instituto Oceanográfico da USP. Em paralelo ao uso do POM, houve a oportunidade de conhecer e utilizar o modelo Delft3D, no IHE – Institute for Water Education em Delft, na Holanda (UNESCO-IHE, 2006). Após o estágio na Holanda, o Professor Dr. Dano Roelvink disponibilizou o modelo, sob uma licença educacional, para uso no Brasil por um período de seis meses (de novembro de 2007 a maio de 2008). Para a avaliação da dispersão da pluma do emissário de Santos foi empregada, como ferramenta, o sistema especialista CORMIX.

Na seqüência são apresentadas as metodologias utilizadas na aplicação destes 3 modelos hidrodinâmicos, sendo que o POM não foi implementado para esta Tese em específico, por já estar implantado no Instituto Oceanográfico para a região de estudo. Neste capítulo, também é apresentada a metodologia utilizada no emprego do CORMIX.

6.2.1 Modelagem Hidrodinâmica – MIKE 21

Resumidamente, apresenta-se a seguir a seqüência de tarefas realizadas no decorrer do trabalho:

- Escolha das áreas a serem modeladas. Foram utilizadas três áreas para a modelagem: uma área considerada de meso-escala, uma área que abrangesse a região de estudo, a Baixada Santista e uma área em detalhe, o Estuário e Baía de Santos, na Figura 11 são apresentadas estas áreas.

- Escolha dos espaçamentos das grades. Nesta etapa, a revisão da bibliografia apresentada teve grande influência. Procurou-se escolher espaçamentos usuais nos trabalhos de modelagem, assim como espaçamentos compatíveis com os recursos computacionais disponíveis.
- Escolha dos períodos e cenários para as simulações. Foram escolhidos três períodos para as simulações, a saber: 18/07/2002 a 10/08/2002 (inverno 2002); 09/02/2002 a 10/03/2002 (verão 2002) e 11/07/2005 a 03/08/2005 (inverno 2005). Estes foram os escolhidos por serem períodos em que dados de medição de campo estavam disponíveis.
- Preparação dos dados de entrada no modelo. Nessa etapa foram elaboradas as batimetrias e as planilhas de dados de maré e vento.
- Escolha dos parâmetros de modelagem. Foram utilizados os mesmos parâmetros de calibração utilizados em Baptistelli (2003), quais sejam: Coeficiente de Manning, Constante de Smagorinsky e Coeficiente de Atrito do Vento. Estes parâmetros foram exaustivamente testados naquela ocasião, portanto optou-se por mantê-los nesta Tese.

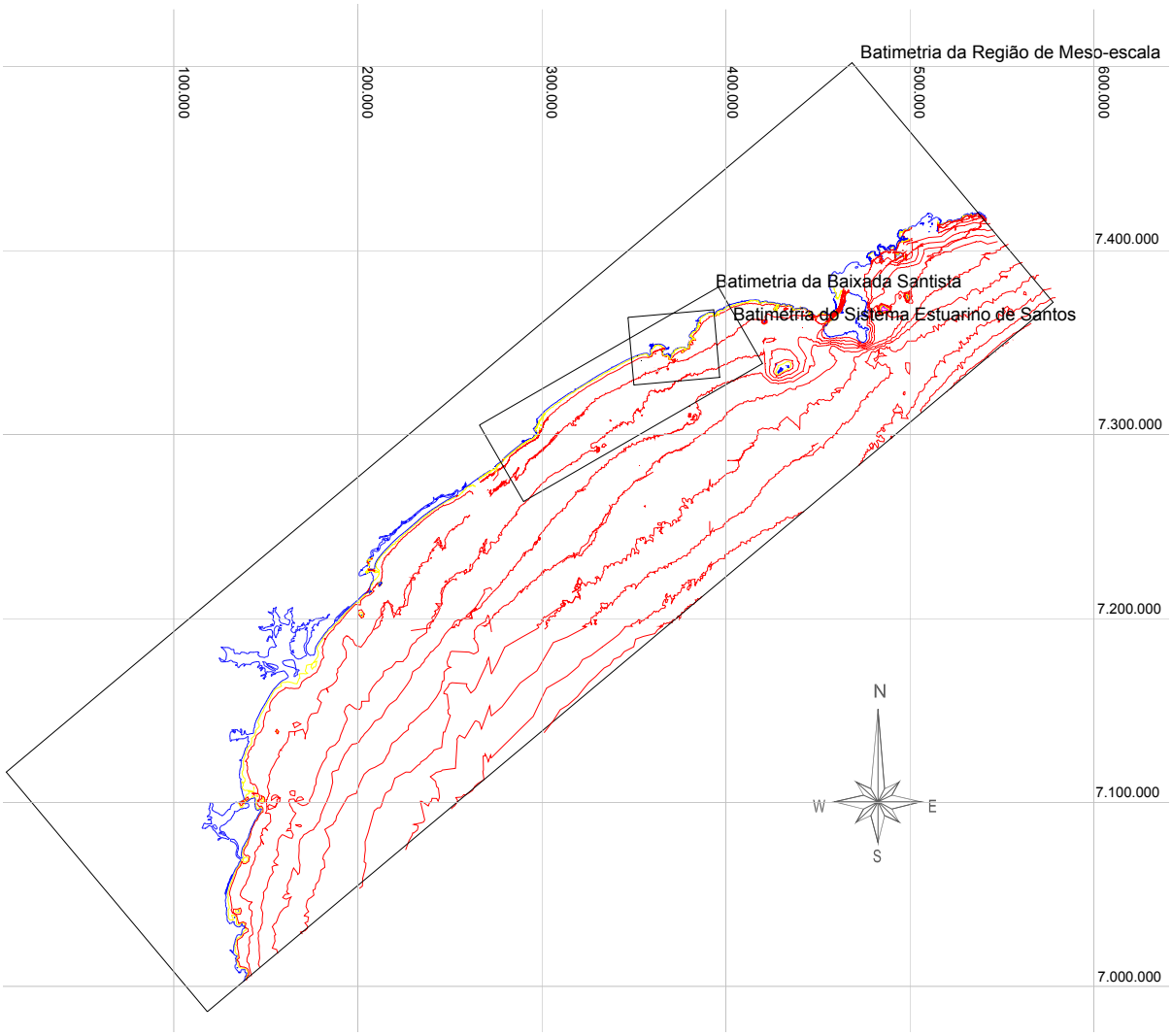


Figura 11 – Figura Esquemática - Área definidas para modelagem – Meso-escala, Baixada Santista e Estuário e Baía de Santos

6.2.1.1 Características e parâmetros empregados na Modelagem de Meso-escala

Para todas as grades (Meso-escala, Baixada Santista e Santos) os períodos de simulação foram:

- 11 de julho a 16 de agosto de 2005 (inverno) (34 dias);
- 9 de fevereiro a 10 de março de 2002 (verão) (31 dias);
- 18 de julho a 10 de agosto de 2002 (inverno) (24 dias).

Na seqüência são apresentados as características e os parâmetros utilizados nas simulações da modelagem da meso-escala.

- Área: 600 x 170 km – de Ubatuba (SP) a Itapema (SC).
- Grade: espaçamento de 2.000 m, grade de 86 x 301 pontos (total de 25.886 pontos).
- Para facilitar a entrada de dados no programa, rotacionou-se a grade em 50º no sentido anti-horário.
- O passo de tempo adotado foi de 300 segundos e o número de Courant obtido foi 4,9 (o número de Courant deve estar em torno de 5, conforme DHI, 2000).
- A imposição das condições de contorno laterais foi obtida através da especificação da elevação da superfície nas bordas abertas. São dois contornos abertos, aqui chamados de borda norte (32 pontos de grade) e borda leste (288 pontos de grade).
- Dados de maré: foi utilizada a mesma metodologia dos mapas cotidais utilizados em Baptistelli (2003), para o qual foi utilizado o trabalho de Harari e Camargo (1994). Somado a estes dados de maré astronômica, foram considerados os dados de maré meteorológica gerados a partir do POM, para os contornos abertos da grade de meso-escala.
- Dados de pressão e vento: a partir de NCEP/NCAR Reanalysis Project – em escala sinótica com espaçamento horizontal de 200 km e Δt de 6 horas. Foi utilizada a entrada de dados da variação temporal e espacial da pressão e do

vento através de arquivo ASCII. Estes arquivos foram elaborados a partir dos dados da NCEP/NCAR Reanalysis Project. Os dados originais, nos pontos específicos fornecidos pelo NCEP foram interpolados para a área de interesse. A elaboração destes arquivos foi realizada pela equipe da ASA Applied Science Associates – South America.

- Coeficientes: de atrito do vento: 0,010; rugosidade: Coeficiente de Manning de 32 $m^{1/3}/s$; viscosidade: Constante de Smagorinsky de 0,50.

Na Figura 12 está apresentada a batimetria gerada no MIKE 21 para a modelagem de meso-escala.

6.2.1.2 Características e parâmetros empregados na Modelagem da Baixada Santista

Na seqüência são apresentados as características e os parâmetros utilizados nas simulações da modelagem da Baixada Santista.

- Área: Baixada Santista – 150 x 48 km
- Grade: espaçamento de 300 m, grade de 161 x 501 pontos (total de 80.661 pontos).
- Para facilitar a entrada de dados no programa, rotacionou-se a grade em 60º no sentido anti-horário.
- São três contornos abertos, aqui chamados de borda norte (123 pontos de grade), borda leste (501 pontos de grade) e borda sul (83 pontos de grade).
- O passo de tempo adotado foi de 60 segundos e o número de Courant obtido foi 4,1.
- Condições de contorno: Foram extraídos os dados gerados nas simulações da grade de meso-escala e estes serviram de dados de entrada para os contornos abertos da grade da Baixada Santista (ferramenta de “transfer boundary”).
- Os coeficientes foram mantidos iguais aos da grade de meso-escala.

Na Figura 13 está apresentada a batimetria da região da Baixada Santista. Esta batimetria foi gerada a partir do modelo MIKE 21.

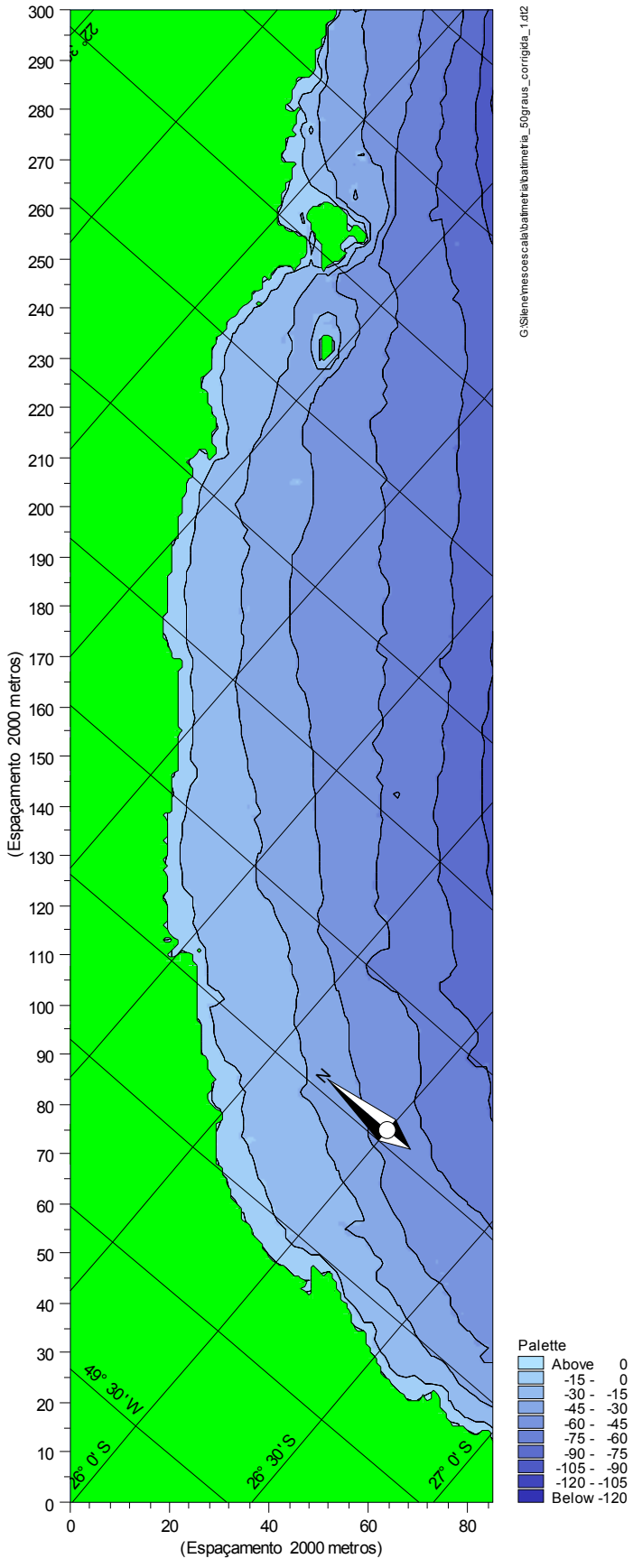


Figura 12 – Batimetria de Meso-escala gerada pelo MIKE 21 – Espaçamento horizontal de 2.000m, grade de 86 por 301 pontos

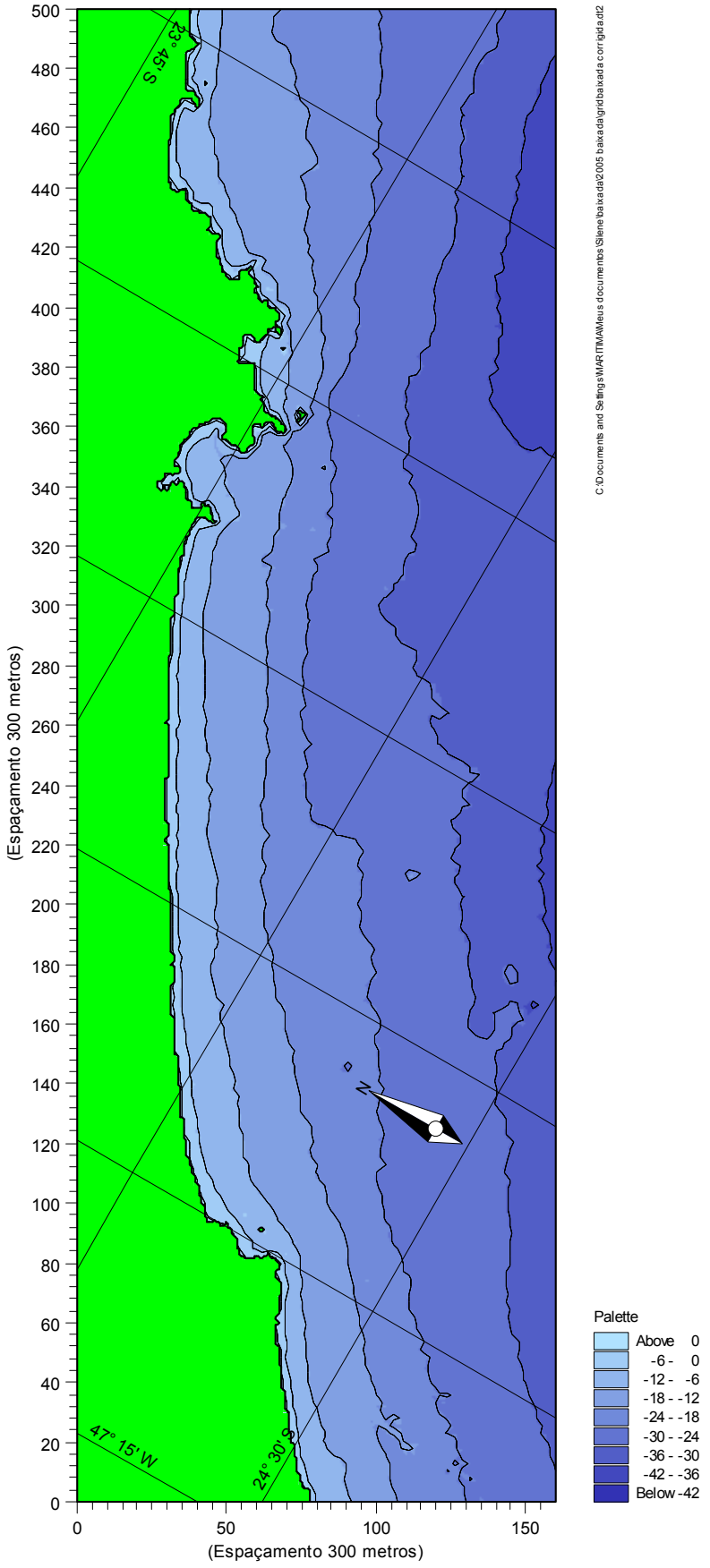


Figura 13 – Batimetria da Baixada Santista gerada pelo MIKE 21 – Espaçamento horizontal de 300m, grade de 161 por 501 pontos

6.2.1.3 Características e parâmetros empregados na Modelagem do Estuário e Baía de Santos

Na seqüência são apresentados as características e parâmetros utilizados nas simulações da modelagem do Estuário e Baía de Santos.

- Área: Estuário e Baía de Santos – 46,8 x 36,9 km
- Grade: espaçamento de 90 m, grade de 521 x 411 pontos (total de 214.131 pontos).
- São três contornos abertos, aqui chamados de borda oeste (163 pontos de grade), borda leste (389 pontos de grade) e borda sul (521 pontos de grade).
- O passo de tempo adotado foi de 30 segundos e o número de Courant obtido foi 6,3.
- Condições de contorno: Foram extraídos os dados gerados nas simulações da grade da Meso-escala e estes serviram de dados de entrada para os contornos abertos da grade do Estuário e Baía de Santos (ferramenta de “transfer boundary”).
- Os coeficientes foram mantidos iguais aos da grade de meso-escala.

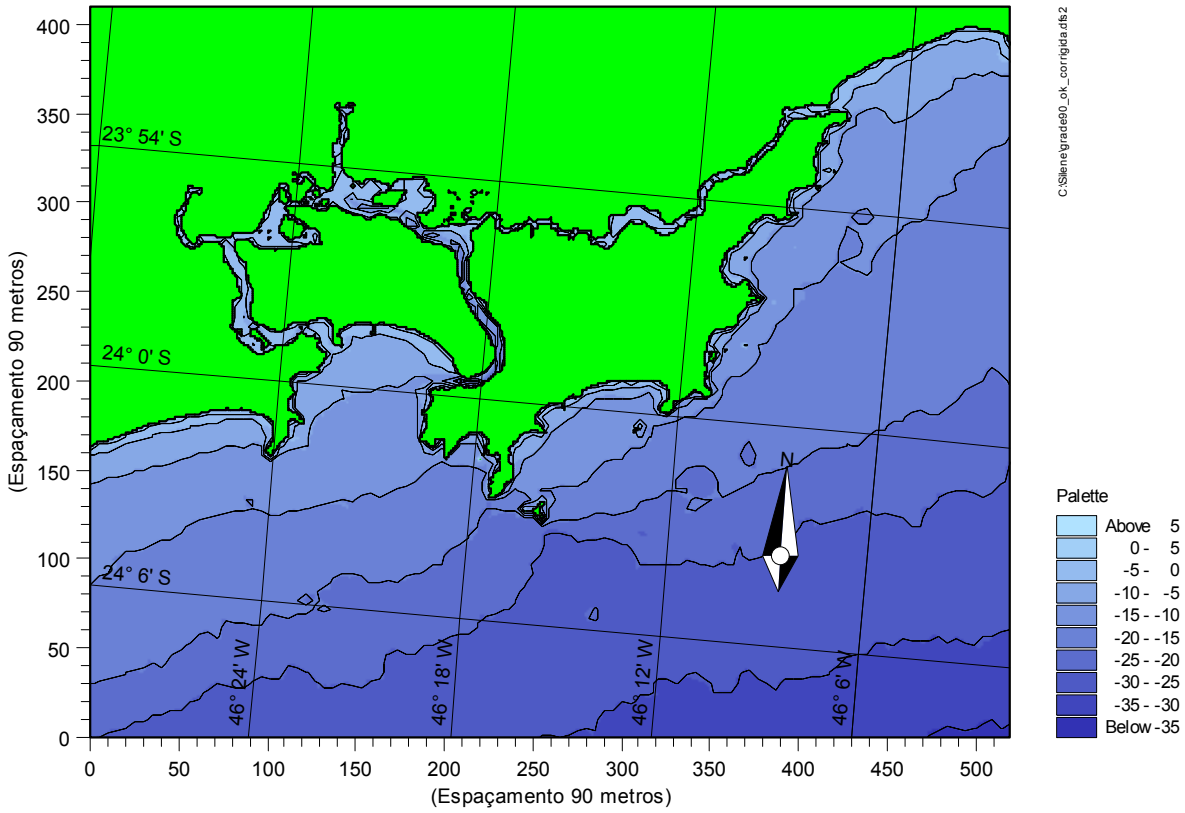


Figura 14 – Batimetria do Estuário e Baía de Santos gerada pelo MIKE 21 HD – Espaçamento horizontal de 90 m, grade de 521 por 411 pontos

6.2.2 Modelagem Hidrodinâmica – POM

6.2.2.1 Metodologia empregada na modelagem

As simulações efetuadas utilizando-se o POM foram possíveis devido a uma parceria com o Instituto Oceanográfico da Universidade São Paulo, na pessoa do Professor Doutor Joseph Harari. Foram realizadas simulações com o modelo já implementado e efetuadas as comparações com os dados de medição de campo. O modelo implementado com uma área de domínio de aproximadamente 120 x 80 km, espaçamento horizontal de aproximadamente 1 km e 11 níveis sigma na vertical. Foram forçantes do modelo a maré, nível médio do mar (dado por um modelo de escala maior e dados de estações oceanográficas costeiras), vento (dados do NCEP) e TS (de modelo de escala maior e Levitus). Foram utilizados os coeficientes de rugosidade de 0,002 m, coeficiente de atrito (quadrático) do vento de 0,00114 e difusão horizontal tipo Smagorinsky com coeficiente de 0,01. A batimetria gerada pelo modelo é apresentada na Figura 15.

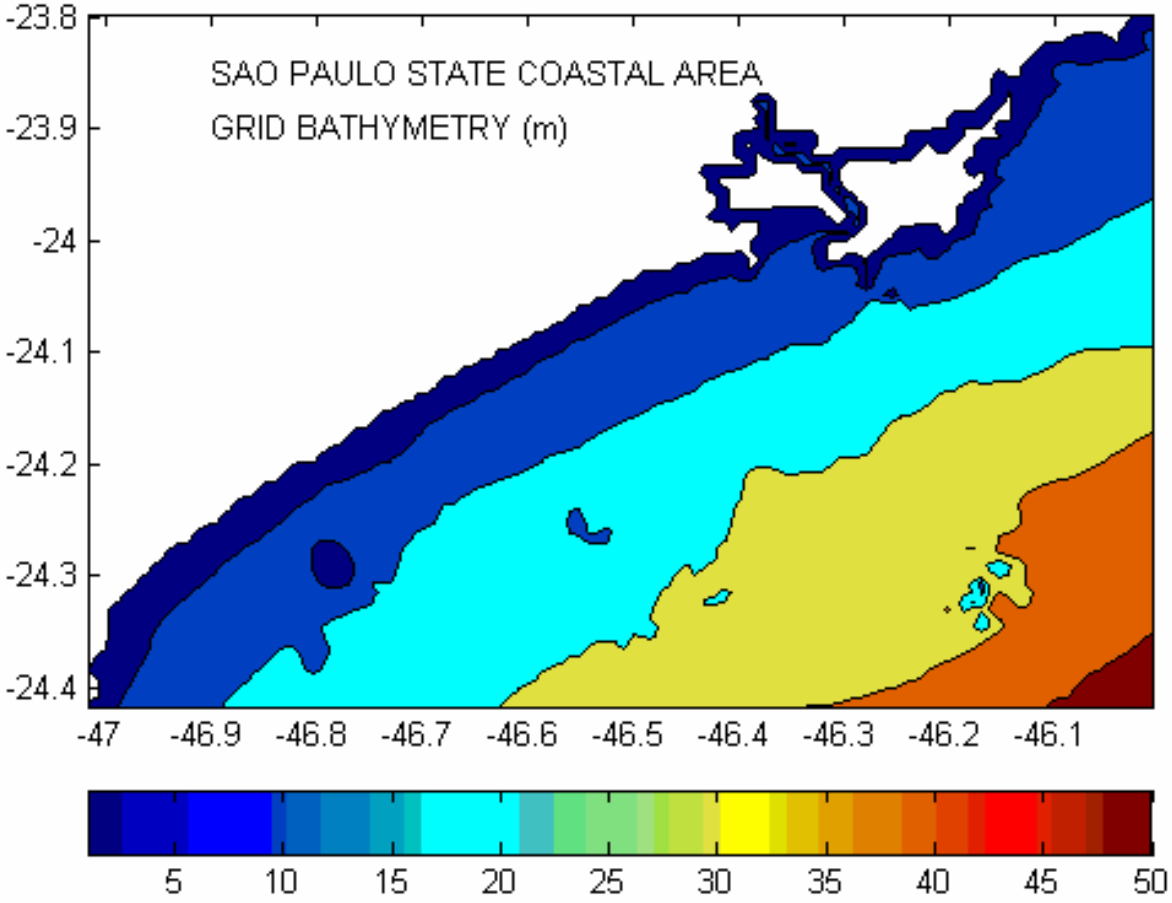


Figura 15 – Batimetria da região da Baixada Santista gerada pelo POM – espaçamento horizontal de 1.000 m – Grade de 120 x 80 km

6.2.3 Modelagem Hidrodinâmica – Delft3D

6.2.3.1 Metodologia empregada na modelagem

Para a utilização do modelo Delft 3D optou-se por modelar apenas a região do Estuário e Baía de Santos.

Resumidamente, apresenta-se a seguir a seqüência de tarefas realizadas no decorrer do trabalho:

- Escolha da área a ser modelada;
- Geração da batimetria e grade, a partir de arquivos em ASCII utilizando os módulos Delft3D-RGFGRID e Delft3D-QUICKIN;
- Especificação das bordas abertas e das condições de contorno;

- Especificação da elevação da superfície com a adoção das constituintes de maré (condições astronômicas);
- Especificação dos processos físicos envolvidos (vento, temperatura e salinidade);
- Escolha dos períodos de simulação;
- Escolha dos parâmetros e coeficientes que serviram de parâmetros de calibração do modelo.

O Delft3D-QUICKIN é o módulo para a geração, interpolação e manipulação de dados de variação espacial de batimetria, condição de contorno ou parâmetros de campo, que serão utilizados pelo Delft3D-FLOW. O arquivo que serviu de base para a elaboração da grade utilizada no processamento das simulações é chamando de arquivo “Sample” que está apresentado na Figura 16. Na Figura 17 é apresentada a grade elaborada a partir do arquivo “Sample”. Foi utilizada uma grade retangular com o espaçamento de 300 m.

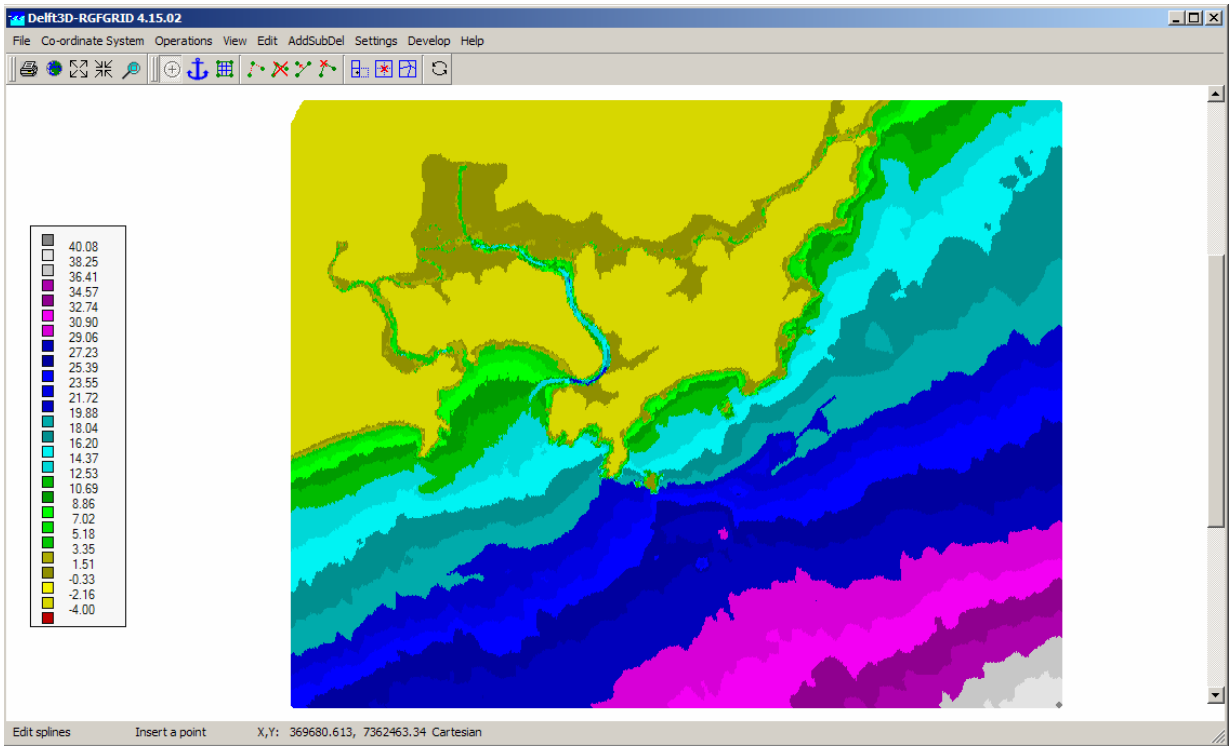


Figura 16 – Figura elaborada a partir de arquivo ASCII da batimetria do Estuário e Baia de Santos – Arquivo “Sample” gerado pelo Delft3D-RGFGRID

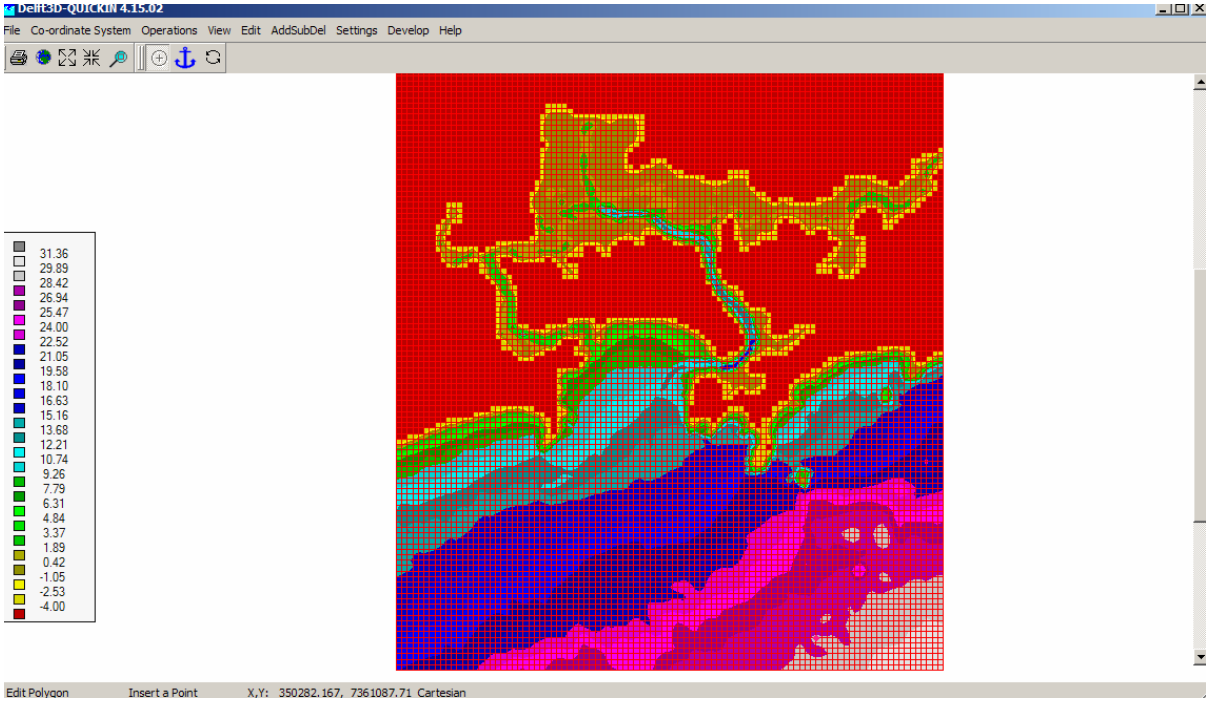


Figura 17 – Grade do Estuário e Baia de Santos gerada a partir do módulo Delft3D-QUICKIN

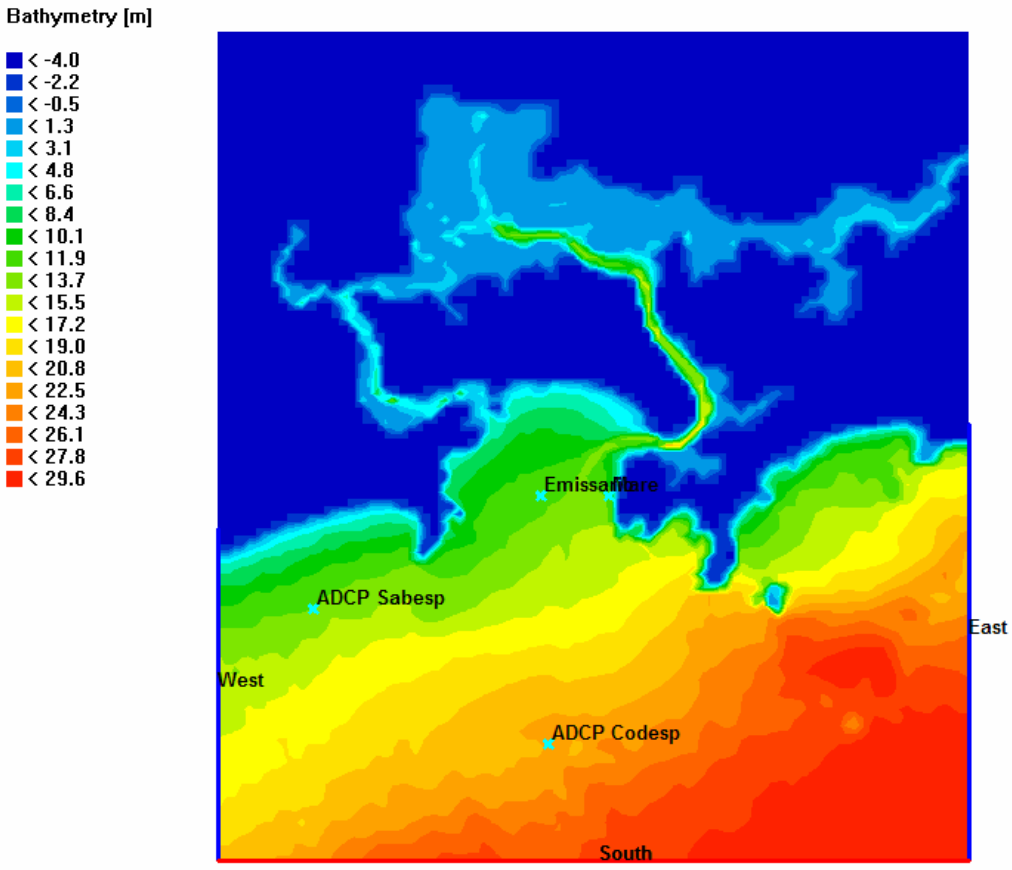


Figura 18 – Batimetria gerada pelo Delft3D – Espaçamento horizontal 300 m, grade de 102 x 112 pontos

O Delft3D-FLOW é o módulo utilizado para as simulações da hidrodinâmica. Nesse módulo são criados e editados os arquivos de entrada de dados (FLOW-GUI). Nesse módulo também é criado o arquivo MDF – Master Definition Flow, onde se monta o cenário a ser simulado. Nesse arquivo são feitas as referências para os arquivos de entrada de dados e que estão em uso no cenário simulado (batimetria, grade, bordas abertas, condições de contorno, vento, maré, etc.).

No processo de calibração do modelo, foram efetuadas diversas rodadas. As simulações foram feitas desde rodadas separadas com os processos envolvidos (com e sem vento e/ou com e sem temperatura e salinidade); variando-se as condições de contornos (“Water Level” ou “Neumann”), usando o módulo bidimensional e tridimensional; variando-se os coeficientes dos parâmetros físicos (atrito do vento, rugosidade, temperatura e salinidade).

A seguir são apresentados os dados e parâmetros utilizados nos cenários de simulação (Master Definition File - MDF-file).

Tabela 5 – Condições iniciais e de contorno, parâmetros físicos e numéricos utilizados na modelagem tridimensional com o Delft3D

<table>
<tr><th>Parâmetro</th><th>Valor</th></tr>
<tr><td>Grade:</td><td>Pontos de grade na Direção M: 102
Pontos de grade na direção N: 112
Espaçamento da Grade: 300 m
Número de camadas:
Verão 2002: 5 camadas
Inverno 2002: 10 camadas
Inverno 2005: 3 camadas</td></tr>
<tr><td>Período de Simulação:</td><td>Verão 2002: 15/02/2002 a 09/03/2002
Inverno 2002: 20/07/2002 a 18/08/2002
Inverno 2005: 23/07/2005 a 14/08/2005</td></tr>
<tr><td>Intervalo de tempo “time step”:</td><td>Verão 2002: 2 minutos
Inverno 2002: 2 minutos
Inverno 2005: 1 minuto</td></tr>
<tr><td>Processos Físicos:</td><td>Vento, Salinidade e Temperatura.</td></tr>
<tr><td>Condições de contorno:</td><td>
<table>
<tr><th>Condições de fluxo</th><th>Sul</th><th>Leste</th><th>Oeste</th></tr>
<tr><td>Tipo de borda aberta</td><td>Elevação da superfície</td><td>Neumann</td><td>Neumann</td></tr>
<tr><td>Tipo de forçante</td><td>Astronômica</td><td>Série temporal</td><td>Série temporal</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td>Forçante Astronômica:</td><td>
<table>
<tr><th>Constituinte</th><th>Amplitude (m)</th><th>Fase (grau)</th></tr>
<tr><td>Q1</td><td>0.027</td><td>62.21</td></tr>
<tr><td>O1</td><td>0.106</td><td>80.87</td></tr>
<tr><td>P1</td><td>0.026</td><td>150.62</td></tr>
<tr><td>K1</td><td>0.069</td><td>163.88</td></tr>
<tr><td>N2</td><td>0.043</td><td>101.02</td></tr>
<tr><td>M2</td><td>0.290</td><td>89.13</td></tr>
<tr><td>S2</td><td>0.205</td><td>87.6</td></tr>
<tr><td>K2</td><td>0.058</td><td>87.55</td></tr>
<tr><td>M3</td><td>0.052</td><td>233.41</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td>Série temporal (Borda Neumann):</td><td>
<table>
<tr><td>Início do período</td><td>0</td></tr>
<tr><td>Fim do período</td><td>0</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td>Viscosidade Turbulenta:</td><td>1,0 $m^2 .s^{-1}$</td></tr>
<tr><td>Coeficiente de atrito do vento:</td><td>0,009 - primeiro e segundo “breakpoints” – (conforme calibração)</td></tr>
<tr><td>Rugosidade do fundo:</td><td>Manning: uniforme: U = V = 0,03 (conforme calibração)</td></tr>
<tr><td>Vento:</td><td>Uniforme – Interpolação Linear – Séries Temporais (NCEP e Vento Local)</td></tr>
<tr><td>Salinidade e Temperatura da água</td><td>Conforme Tabela 11.</td></tr>
<tr><td>Pontos de Observação:</td><td>Emissário, Maré, ADCP-SABESP, ADCP-CODESP (ver Figura 18).</td></tr>
</table>

6.2.4 Modelagem de Dispersão da Pluma (Campo Próximo) – CORMIX

6.2.4.1 Metodologia empregada na modelagem

Para a avaliação da dispersão da pluma (campo próximo) do emissário de Santos / São Vicente foram cumpridas as seguintes etapas:

- Extrair série temporais de velocidade de correntes dos resultados das simulações com o POM e o Delft3D e analisar as velocidades máximas, mínimas e médias. Estes dados são apresentados em forma de gráficos no capítulo de resultados.
- Analisar os dados de medição de campo de correntes medidas no ponto de lançamento do emissário, efetuadas no trabalho SABESP (2006).
- Estabelecer cenários para as simulações de campo próximo. Estes cenários foram definidos em função da velocidade da corrente, do perfil de densidade (uniforme ou estratificado) e da configuração do trecho difusor do emissário.
- Efetuar as simulações do comportamento da pluma para o parâmetro Coliforme Fecal.
- Avaliar os resultados quanto à concentração e diluição do poluente no final do campo próximo e extensão deste campo próximo.

7 BASE DE DADOS

7.1 Considerações Gerais

Neste capítulo são apresentados os dados de medição que foram utilizados na inicialização, calibração e validação dos modelos.

Para os dados de correntes, ventos, maré, salinidade e temperatura da água foram utilizadas as seguintes fontes:

- Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo - SABESP;
- HIDROCONSULT – Consultoria, Estudos e Projetos Ltda.;
- UNISANTA – Universidade Santa Cecília e CODESP – Companhia Docas do Estado de São Paulo.
- Diretoria de Hidrologia e Navegação da Marinha do Brasil – DHN, Banco Nacional de Dados Oceanográficos – BNDO
- NCEP – National Centers for Environmental Prediction e NOAA – National Oceanic & Atmospheric Administration

Na Tabela 6 é apresentada a localização dos pontos dos dados de medição. Na Tabela 7 é apresentada a localização dos pontos de lançamento dos emissários submarinos de Santos / São Vicente e Praia Grande.

Na Figura 19 é apresentada a localização dos pontos dos dados de medição e dos pontos de lançamento dos emissários submarinos de Santos / São Vicente e Praia Grande.

Tabela 6 - Localização dos pontos de medição de campo

Descrição do dado	Projeto / Localização	Coordenadas				Período
		Geodésicas		UTM		
		Latitude	Longitude	Latitude	Longitude	
Anemógrafo – Vento	CODESP (2002) – Ilha das Cabras	24° 0,5' S	46° 13,1' W	7.344.279N	376.078E	07/02 a 03/04/2002 e 19/07 a 27/09/2002
Anemógrafo – Vento	SABESP (2006) – Praia Grande	24° 1,46' S	46° 27,6' W	7.342.274N	351.568E	22/07 a 17/11/2005
Marégrafo – Maré	CODESP (2002) – Ilha das Palmas	24° 0,6' S	46° 19,6'W	7.343.995N	365.060E	09/02 a 27/03/200 e 18/07 a 13/09/2002
ADCP - Correntes	CODESP (2002) – Santos	24° 5,2' S	46° 17,8'W	7.334.187N	362.441E	09/02 a 27/03/2002 e 18/07 a 13/09/2002
ADCP - Correntes	SABESP (2006) – Praia Grande	24° 2,95' S	46° 26,5'W	7.339.555M	353.476E	11/07 a 15/08/2005

Tabela 7 – Localização dos pontos de lançamento dos emissários submarinos

Descrição	Coordenadas			
	Geodésicas		UTM	
	Latitude	Longitude	Latitude	Longitude
Emissário Santos / São Vicente	24° 0' 9" S	46° 21' 8" W	7.344.809N	362.446E
Emissário Praia Grande – PG1	24° 2' 36"S	46° 24'11" W	7.340.236N	357.334E
Emissários Praia Grande - PG2	24° 3' 8"S	46° 26'19" W	7.339.204N	353.723E

Obs.: Projeção Datum: Córrego Alegre

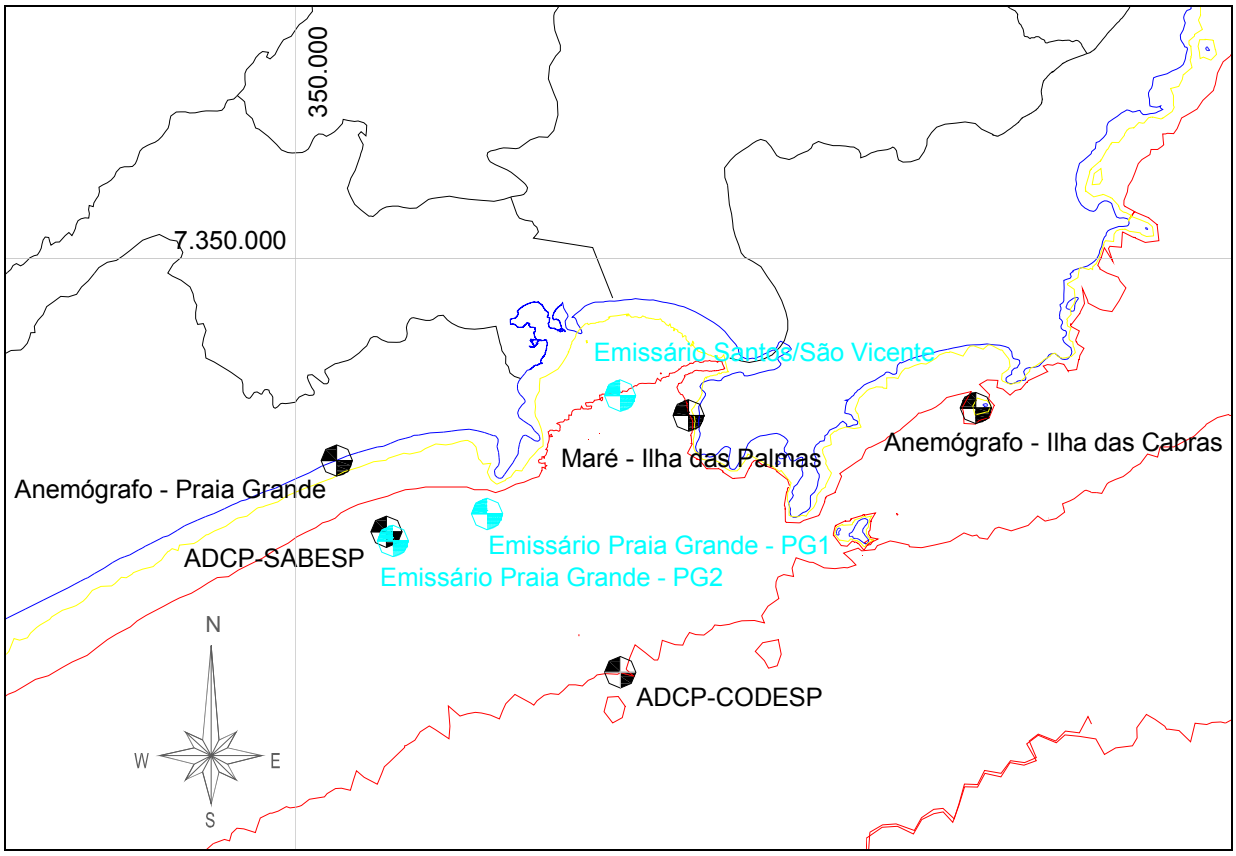


Figura 19 – Localização dos pontos de medição de campo e dos pontos de lançamento dos emissários submarinos de Santos / São Vicente e Praia Grande

7.2 Batimetria

Os dados batimétricos utilizados neste trabalho foram: cartas náuticas, folhas de bordo da Marinha do Brasil e levantamentos batimétricos. As folhas de bordo são cartas originais onde são encontrados dados batimétricos obtidos de uma sondagem hidrográfica e possuem melhor detalhamento que as cartas náuticas. Todos estes dados foram digitalizados e constam do CD – Projeto de Preparação de Base Batimétrica Digitalizada para a Costa do Estado de São Paulo (Alfredini e col, 2002). A documentação cartográfica utilizada foi a seguinte:

- Folhas de bordo da Marinha do Brasil:
  - FB-1600-002/79 – da Ilha Grande à Ilha de Alcatrazes, Escala 1:150.000.
  - FB-1642-002/84 – da Barra Sul do Canal de São Sebastião à Ilha dos Gatos, Escala 1:100.000.

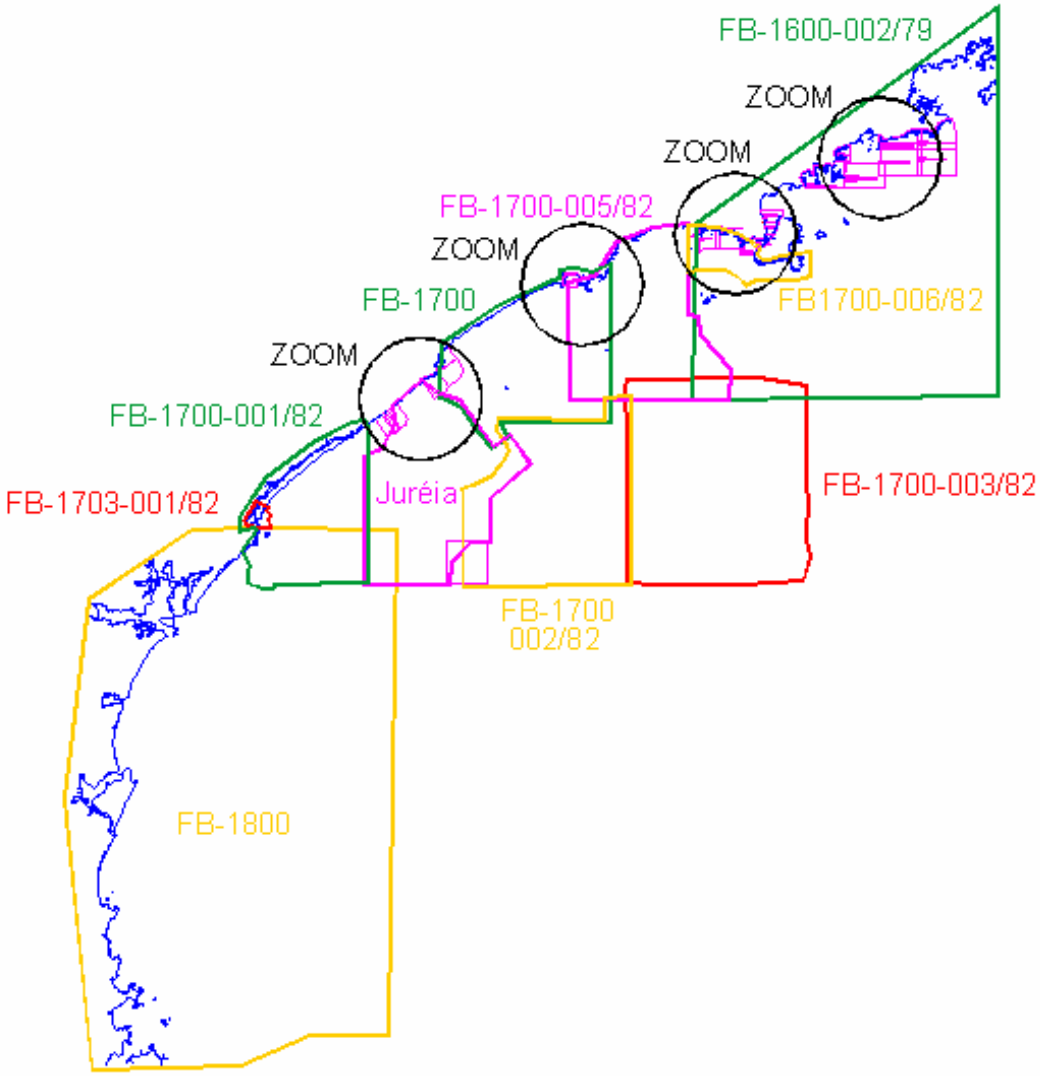
- FB-1643-002/84 – da Ponta do Guaecá à Ilha do Toque-Toque, Escala 1:10.000.
- FB-1700-002/74 – Porto de Santos, Escala 1:15.000.
- FB-1700-001/82 – da Ilha do Bom Abrigo à praia da Juréia, Escala 1:100.000.
- FB-1700-002/82 – Sul da Ilha Queimada Grande, Escala 1:100.000.
- FB-1700-003/82 – Sul da Ilha de Alcatrazes, Escala 1:100.000.
- FB-1700-005/82 – da Ilha da Moela à Ilha Montão de Trigo, Escala 1:100.000.
- FB-1700-006/82 – Proximidades da Barra Sul do Canal de São Sebastião, Escala 1:100.000.
- FB-1701-001/74 – Levantamento da Baía de Santos, Escala 1:15.000.

➢ Cartas Náuticas:

- Carta Náutica 1701 – Detalhe de São Vicente. Escala natural 1:23.000 na latitude 24º00'.
- Carta Náutica 1800 – Paranaguá, Escala 1:284.530

➢ Levantamento batimétrico:

- CTH-1976 – Baía de São Vicente. Escala 1:2000.
- CTH-1968 – Santana (fl. 2282). Mar Pequeno-Barreiros (fl. 2054); Casqueiro (fl. 2208); Barreiro-Casqueiro (fl. 2080).



Fonte: Alfredini e Col. (2002)

Figura 20 – Esquemático das Folhas de Bordo e Cartas Náuticas digitalizadas.

A partir dos dados digitalizados foi possível determinar, para cada ponto da grade, a cota batimétrica, através do programa de computador AutoCadMap®. Estes dados foram exportados em formato ASCII e colocados da forma adequada em cada um dos modelos matemáticos utilizados.

7.3 Vento

De acordo com dados do relatório CODESP (2002), foram feitas medições de intensidade e direção de vento, no centro da praia da Enseada no Guarujá (Anemógrafo – Ilha das Cabras, ver Figura 19), nos períodos de verão de 07/02/2002 a 03/04/2002, e de inverno de 19/07/2002 a 27/09/2002, que são apresentados a seguir (Figura 21 e Figura 22):

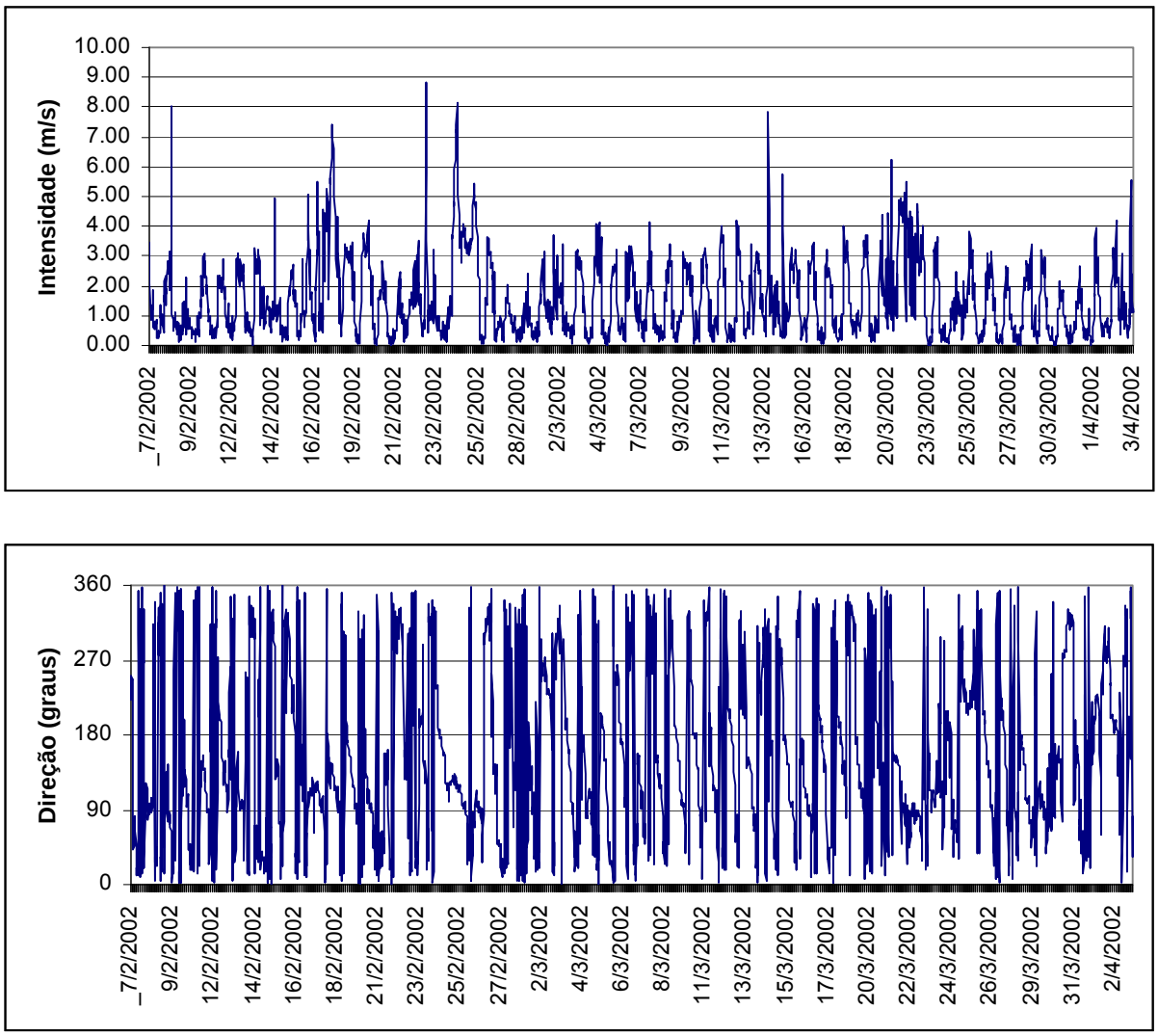


Figura 21 – Dados de medição de vento na praia da Enseada no Guarujá – Anemógrafo Ilha das Cabras – Campanha de Verão – 07/02/2002 a 03/04/2002

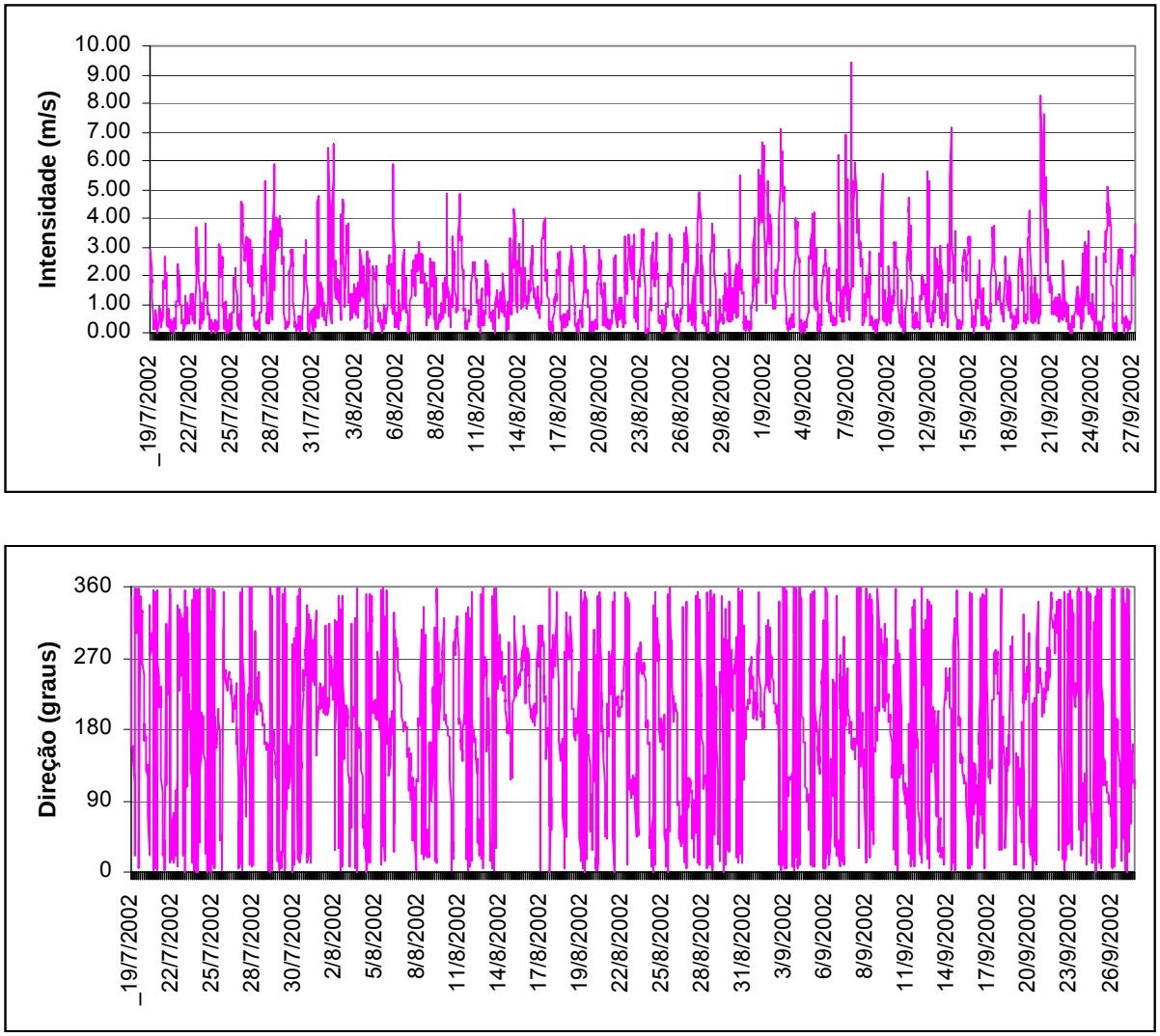


Figura 22 – Dados de medição de vento na praia da Enseada no Guarujá – Anemógrafo Ilha das Cabras - Campanha de Inverno – 19/07/2002 a 27/09/2002

A seguir são apresentadas as Rosas dos Ventos para os dados da praia da Enseada no Guarujá.

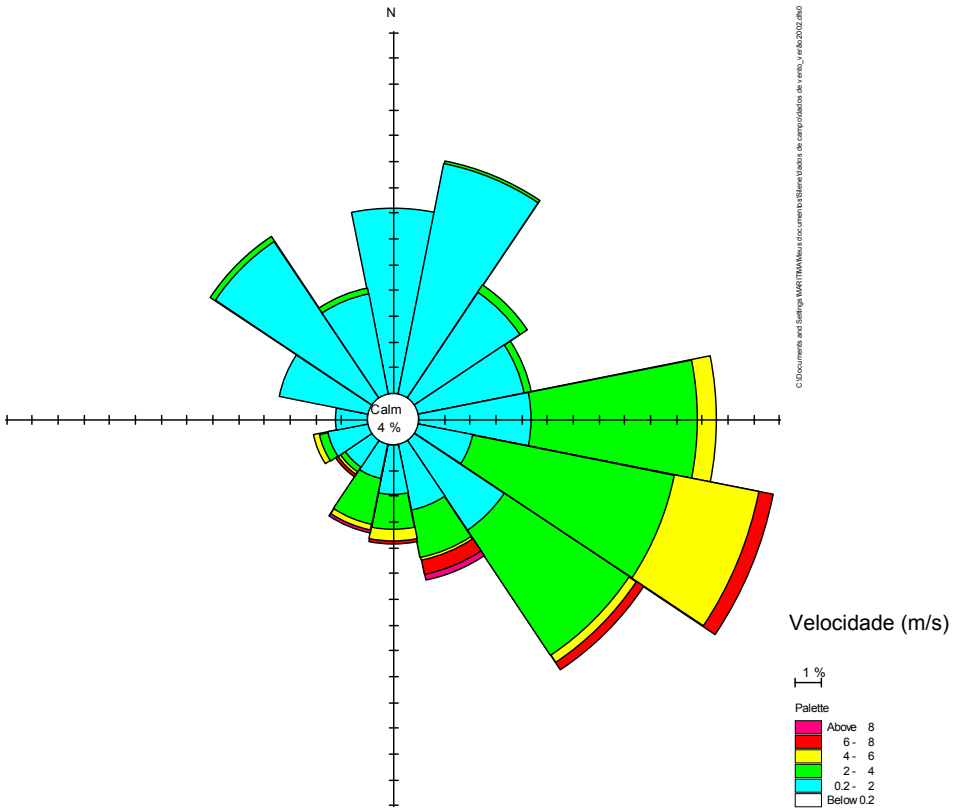


Figura 23 – Rosa dos ventos – Dados de ventos medidos na praia da Enseada do Guarujá – Anemógrafo da Ilha das Cabras - Verão 2002

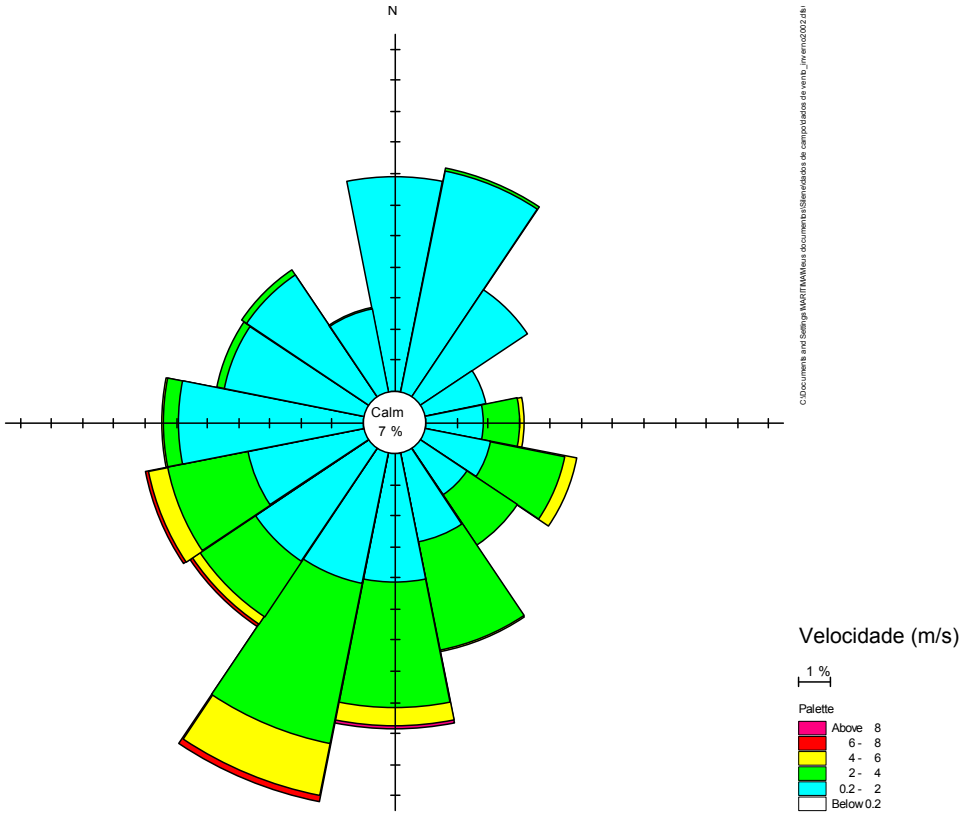


Figura 24 - Rosa dos ventos – Dados de ventos medidos na praia Enseada do Guarujá – Anemógrafo da Ilha das Cabras - Inverno 2002

Conforme dados de SABESP (2006), foram feitas medições de intensidade e direção do vento, na região da Praia Grande (Anemógrafo Praia Grande – ver Figura 19), no período de 22/07/2005 a 17/11/2005, que são apresentados na Figura 25.

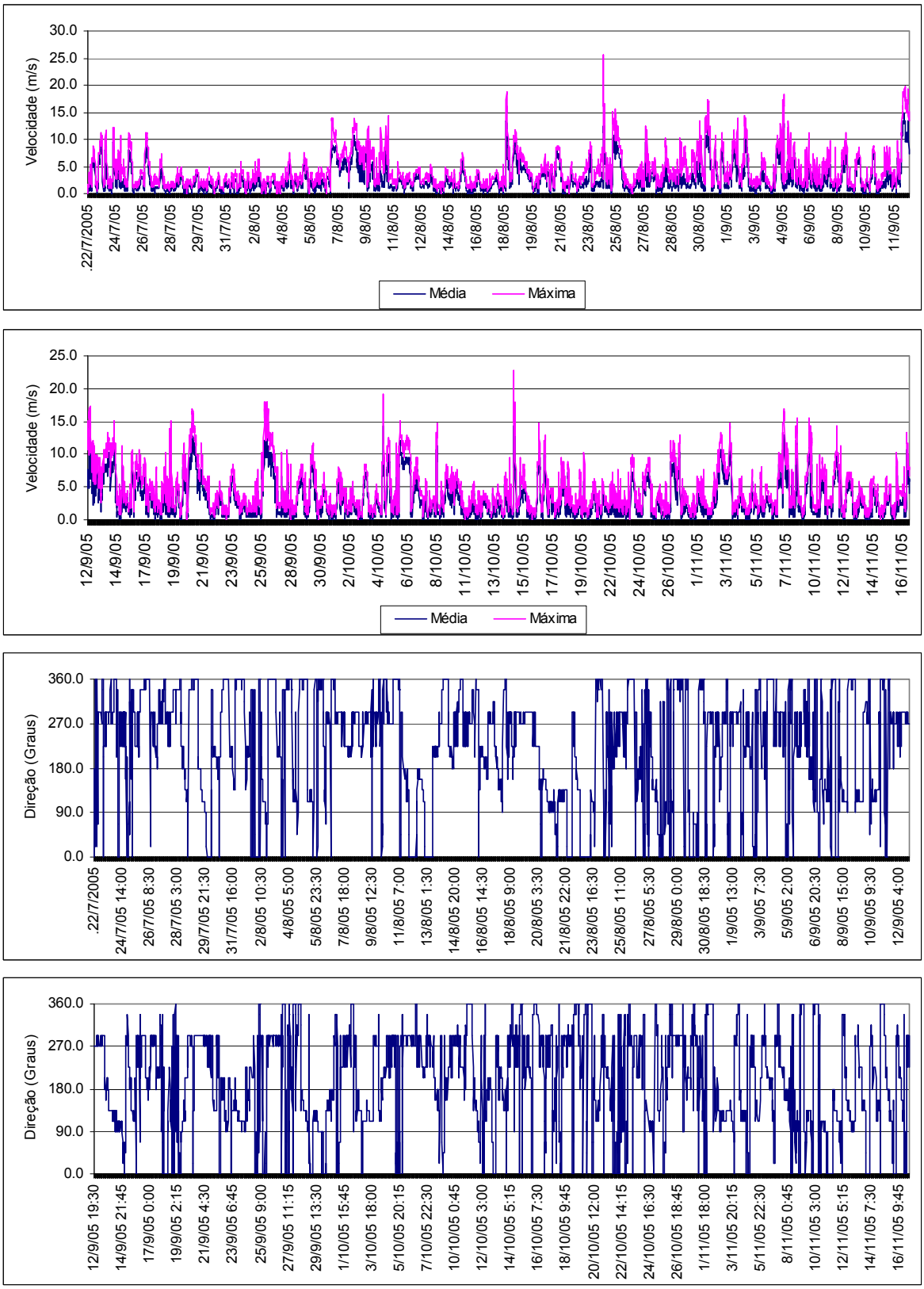


Figura 25 - Dados de medição de vento na Praia Grande – Anemógrafo Praia Grande - 22/07/2005 a 17/11/2005

Na Figura 26 é apresentada a Rosa dos Ventos para os dados de vento de 2005.

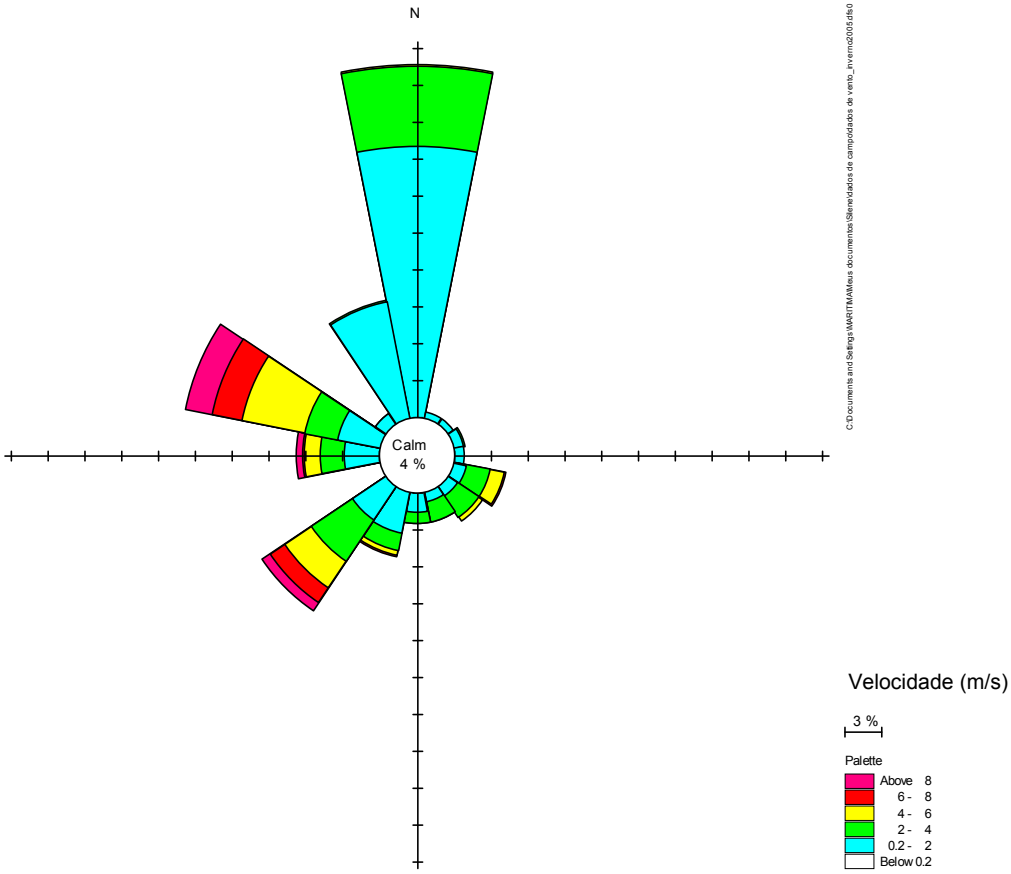


Figura 26 - Rosa dos ventos – Dados de ventos medidos na Praia Grande – Anemógrafo Praia Grande – Período de 22/07/2005 a 17/11/2005

Segundo a análise do espectro de amplitudes (Figura 27) apresentado em SABESP (2006), calculado para os dados de vento medidos na Praia Grande para o período de 22/07/2005 a 22/12/2005, as principais concentrações de energia ocorrem nas freqüências de 1 cpd (ciclos por dia) e 0,2 cpd, correspondendo aos períodos de 1 e 5 dias, respectivamente.

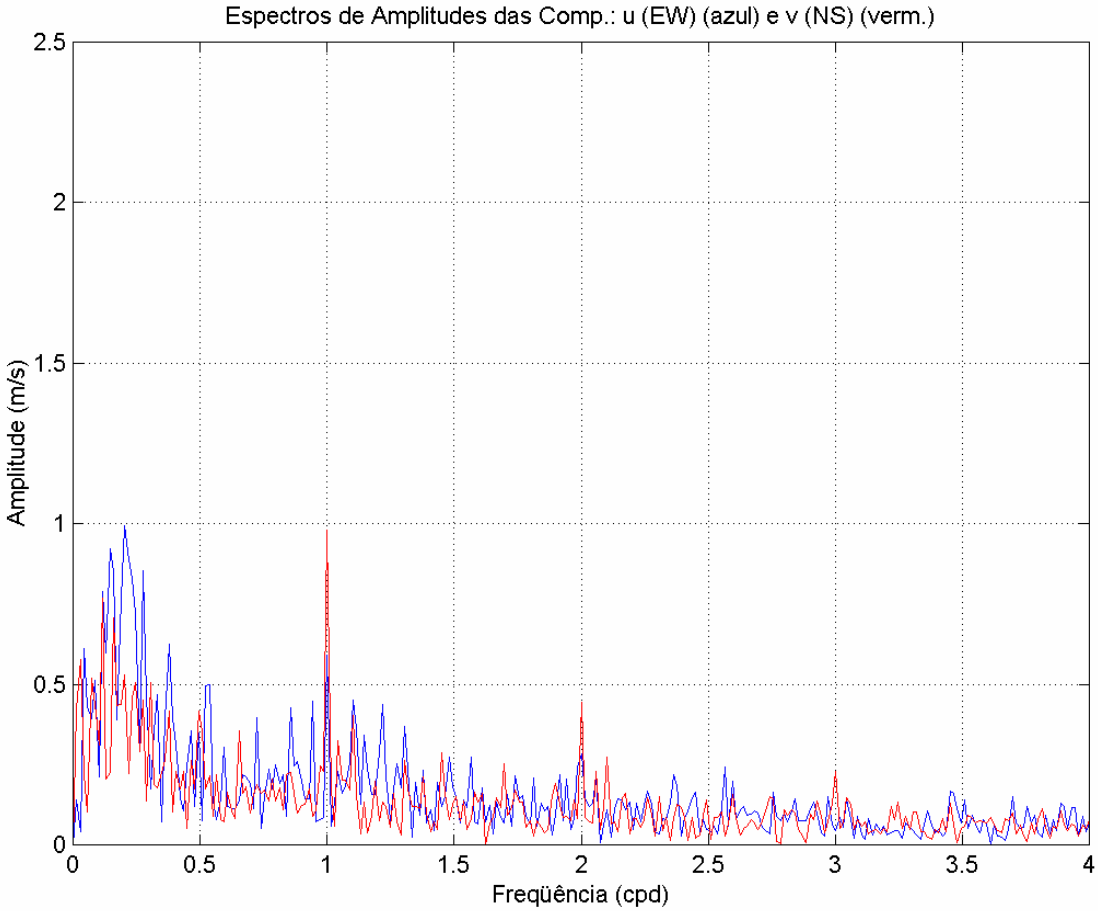


Figura 27 – Espectro de amplitudes das componentes dos vetores de vento medidos na Praia Grande – Período de 22/07/2005 a 22/12/2005. Fonte: SABESP (2006)

A seguir é feita comparação entre os dados de medição do vento, apresentados anteriormente, e os dados do NCEP utilizados nas simulações. Esta comparação é feita extraindo a série temporal dos dados de vento diretamente do arquivo preparado para a entrada de dados dos modelos, assim estes valores já estão interpolados e são referentes aos respectivos pontos de medição do vento. Esta comparação contribui para uma análise qualitativa quanto à validade dos dados do NCEP.

Na Figura 31 é apresentado um instante da variação espacial do vento e da pressão, referente à entrada dos dados de vento e pressão nos modelos implementados.

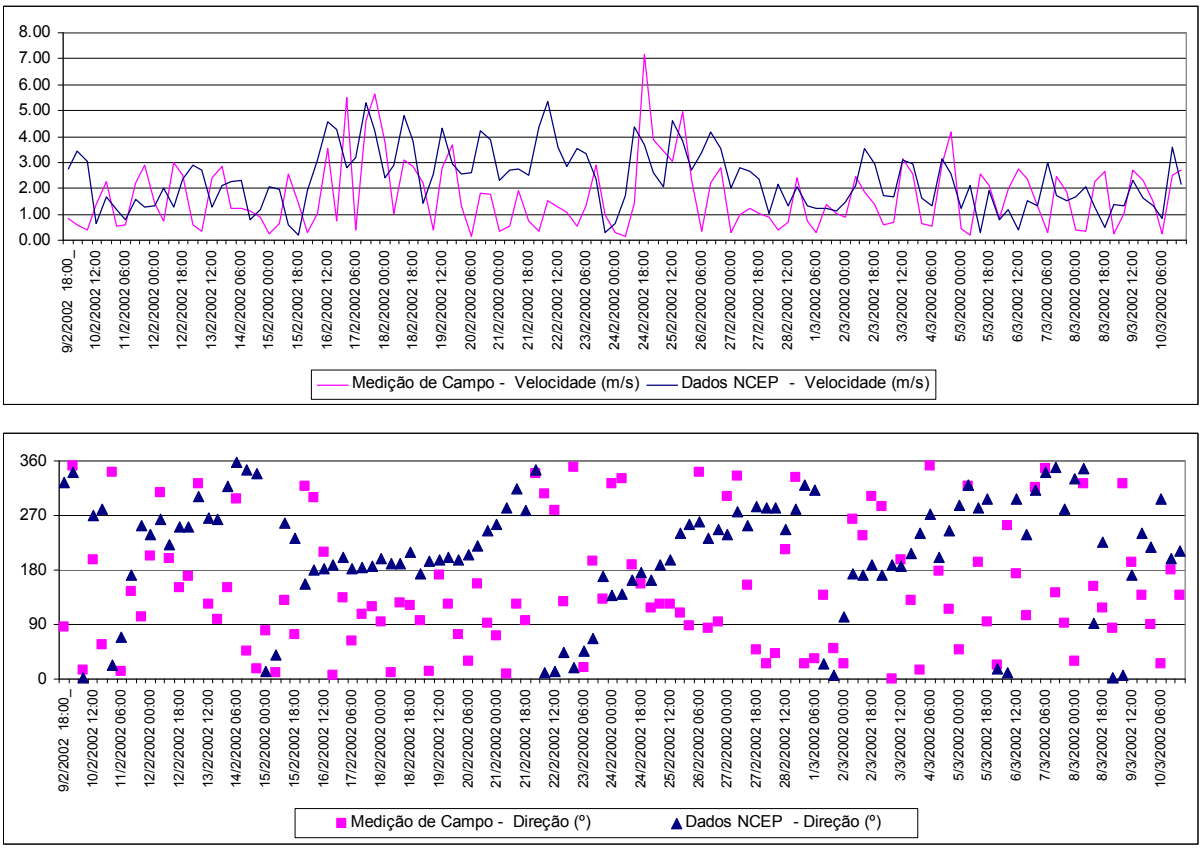


Figura 28 – Comparação entre os dados de vento medidos na praia da Enseada e os dados de vento do NCEP – Verão 2002

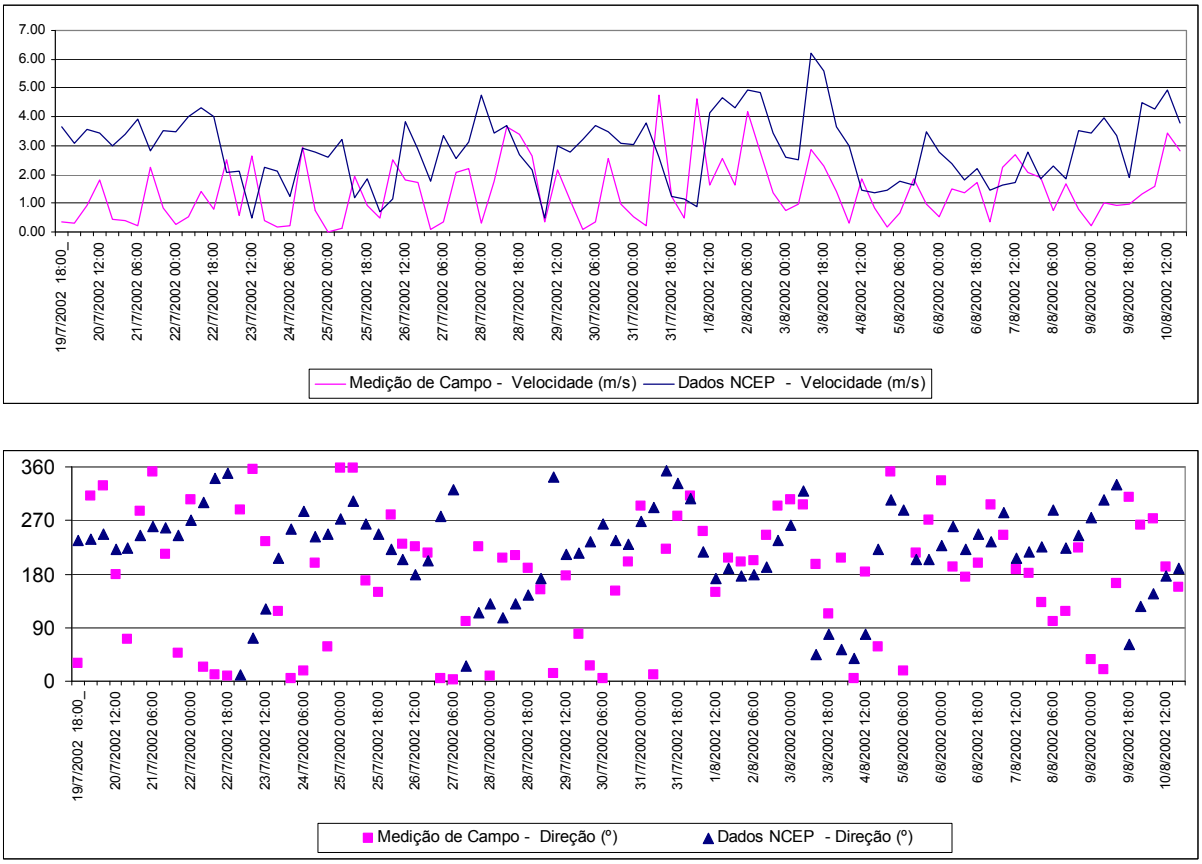


Figura 29 – Comparação entre os dados de vento medidos na praia da Enseada e os dados de vento do NCEP – Inverno 2002

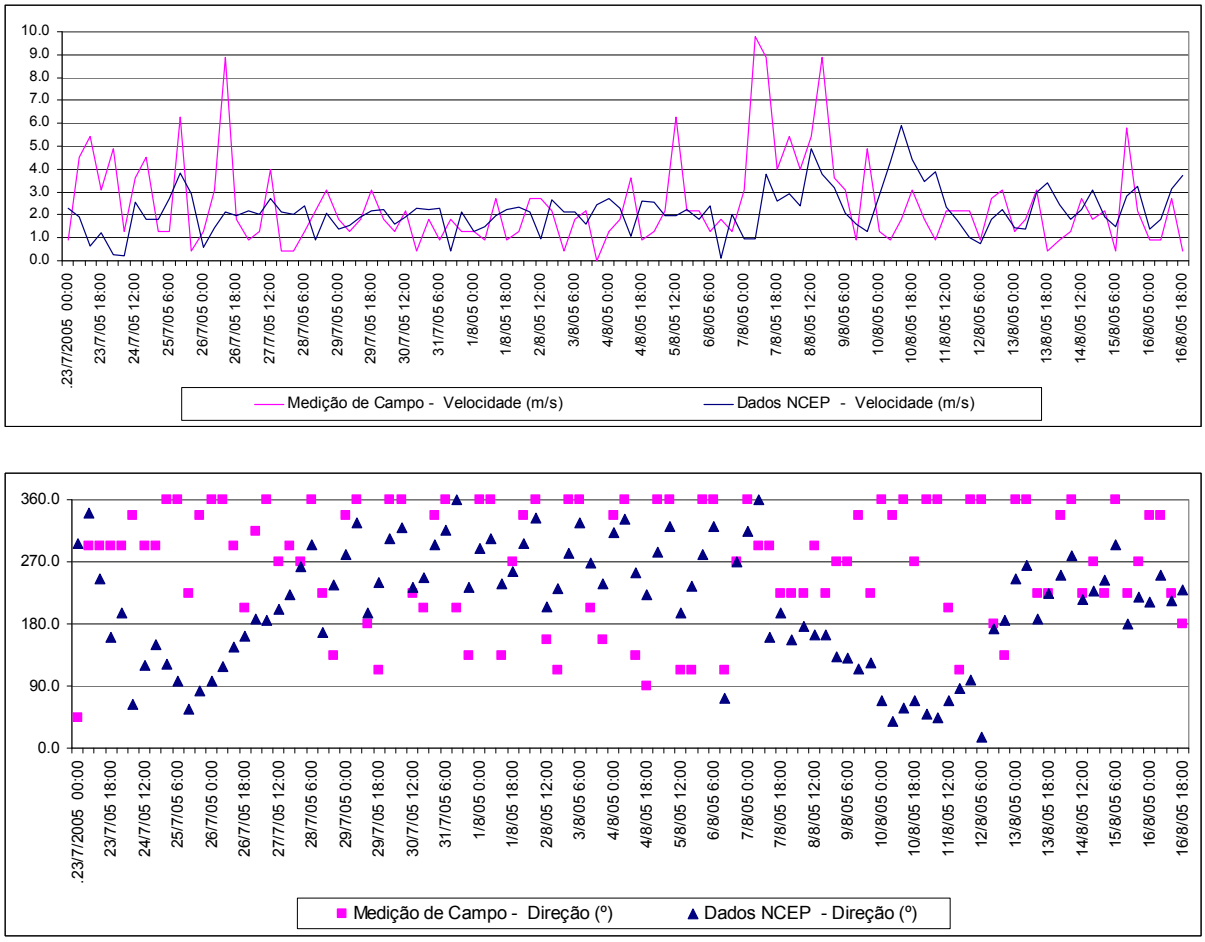


Figura 30 – Comparação entre os dados de vento medidos na Praia Grande e os dados de vento do NCEP – Inverno 2005

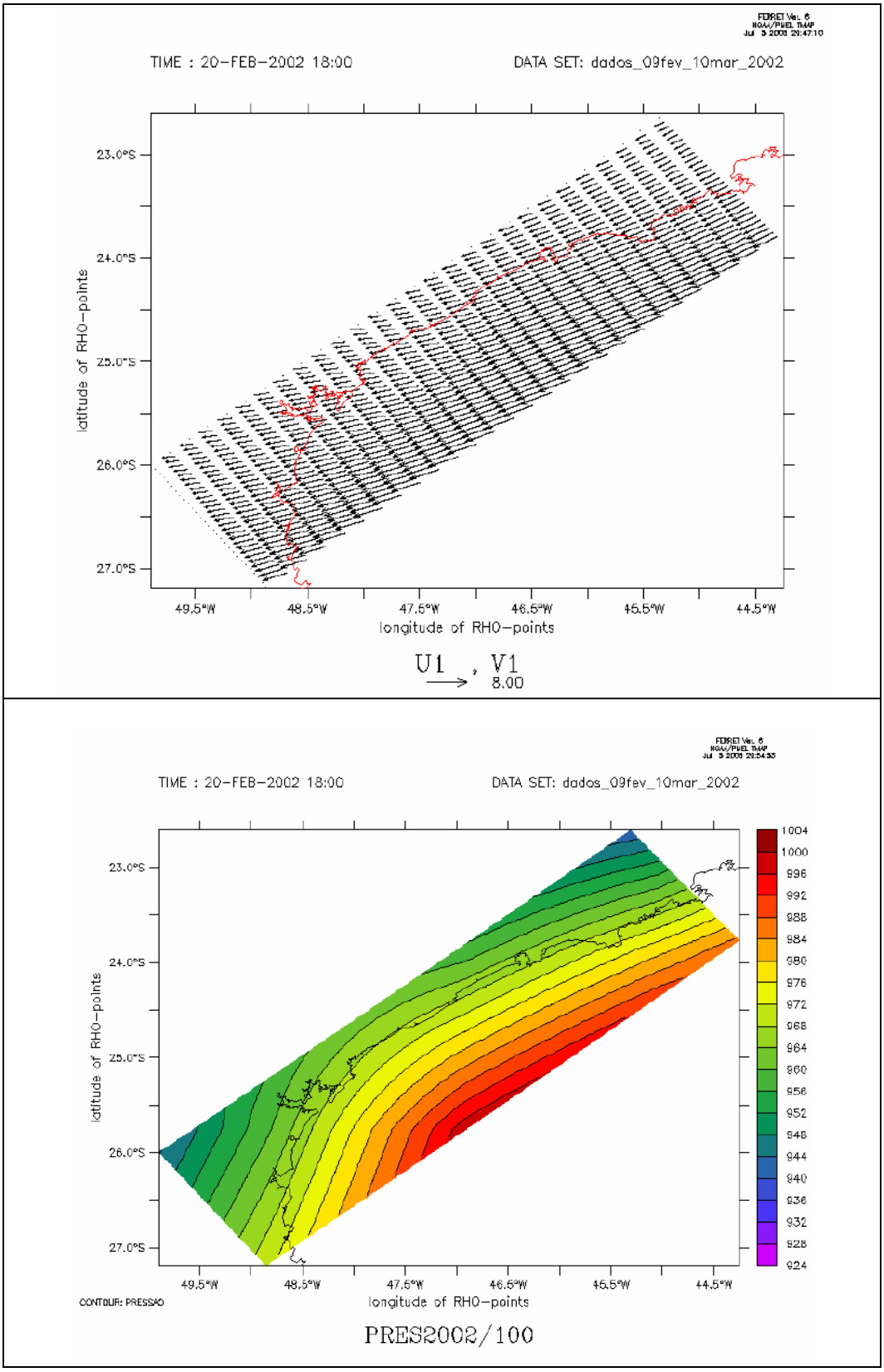


Figura 31 – Representação da distribuição espacial do vento e da pressão na área de estudo – Dados NCEP

7.4 Maré

7.4.1 Considerações gerais

A maré na região de estudo pode ser classificada, de acordo com alguns autores, da maneira como segue:

Segundo Harari e Camargo (1994), a maré no Estuário e Baía de Santos tem caráter semidiurno; a amplitude média de sizígia é de 1,23 m e a de quadratura é igual a 0,27 m (para o Porto de Santos); e as frentes frias (freqüentes na região, especialmente durante o inverno) produzem alterações no nível médio do mar, que podem ultrapassar meio metro.

Conforme Picarelli (2001), a região denominada Centro-Sul do Estado de São Paulo, que abrange desde o município de Praia Grande até o Complexo Estuarino Lagunar de Iguape e Cananéia, inclusive, pode ser classificada como possuindo maré-mista, principalmente do tipo semi-diurno, com 2 preamares e 2 baixa-mares com desigualdades em alturas.

Harari e Camargo (1994) apresentam a simulação das 9 principais componentes de maré (M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1 e M3) na Plataforma Sudeste Brasileira e os resultados mostram que as marés são amplificadas na parte sul da plataforma modelada. Os resultados também demonstram o predomínio do sentido anti-horário na rotação das elipses das correntes de maré de superfície, com exceção da M3.

Na seqüência serão apresentados os dados de medição de campo utilizados nesta Tese. Estes dados foram utilizados na comparação com os dados dos resultados dos modelos, e assim verificada a correlação entre eles.

De acordo com dados do relatório CODESP (2002), foram feitas medições de elevação da superfície, na Ilha das Palmas (24º 06'S; 46º19,6'W), nos períodos de verão de 9/2/2002 a 27/3/2002, e de inverno de 18/07/2002 a 13/09/2002, que são apresentados a seguir:

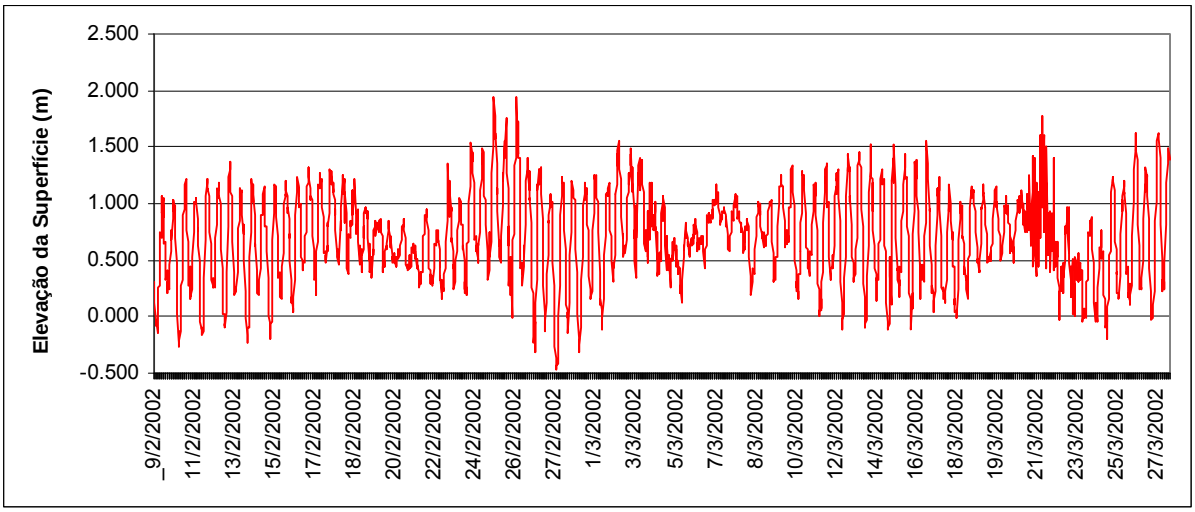


Figura 32 – Dados registrados pelo Marégrafo na Ilha das Palmas na Campanha de Verão – 09/02/2002 a 27/03/2002

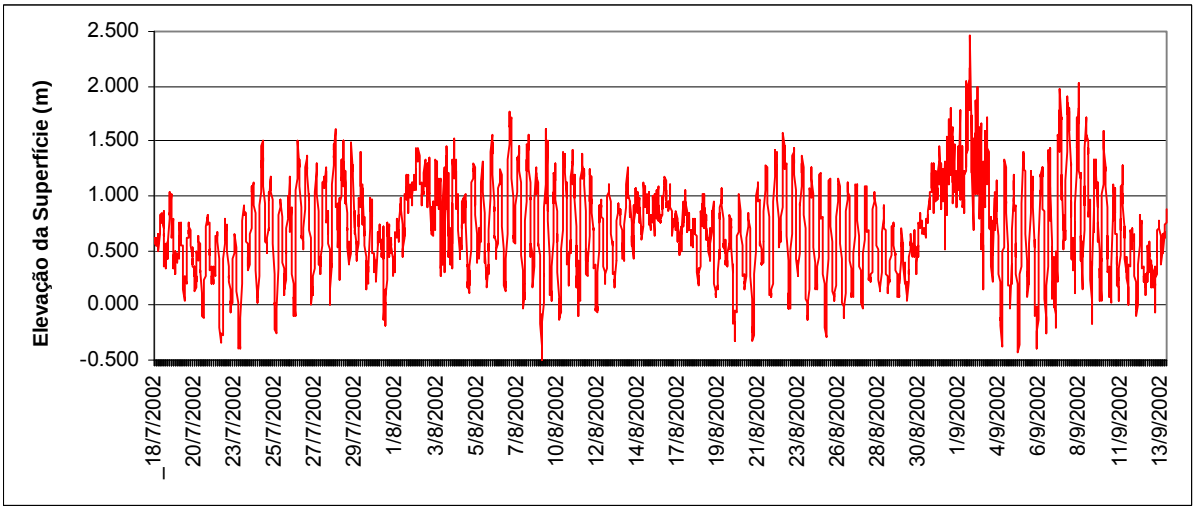


Figura 33 – Dados registrados pelo Marégrafo na Ilha das Palmas na Campanha de Inverno - 18/07/2002 a 13/09/2002

Foram feitas medições de elevação da superfície no Marégrafo na Ilha das Palmas, também para o período de 01/07/2005 a 31/08/2005 e são apresentados a seguir:

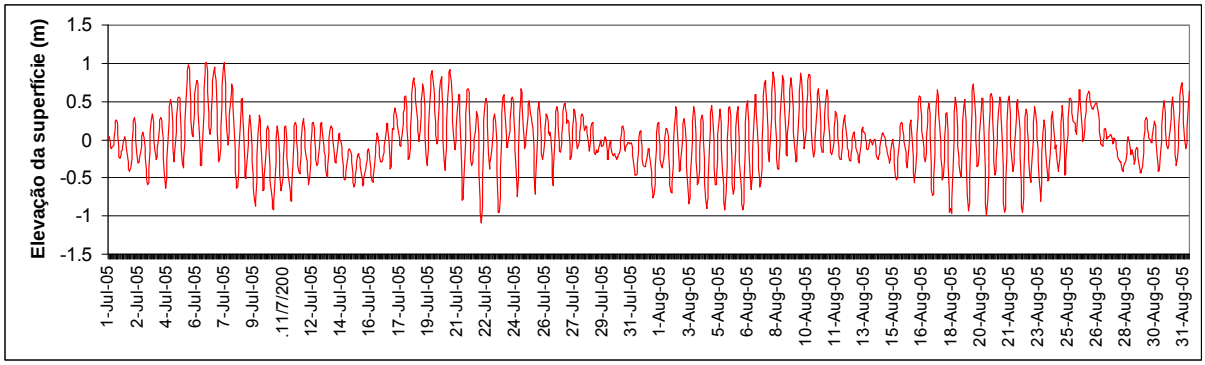


Figura 34 - Dados registrados pelo Marégrafo na Ilha das Palmas na Campanha de Inverno – 01/07/2005 a 31/08/2005

7.5 Correntes

De acordo com dados do relatório CODESP (2002), foram feitas medições de correntes com ADCP em ponto na região de Santos (Ponto ADCP-CODESP), nos períodos de verão de 9/2/2002 a 27/3/2002, e de inverno de 18/07/2002 a 13/09/2002 em 17 profundidades. Os gráficos de direção e intensidade das correntes para três profundidades (1m, 8m, 17m) são apresentados a seguir:

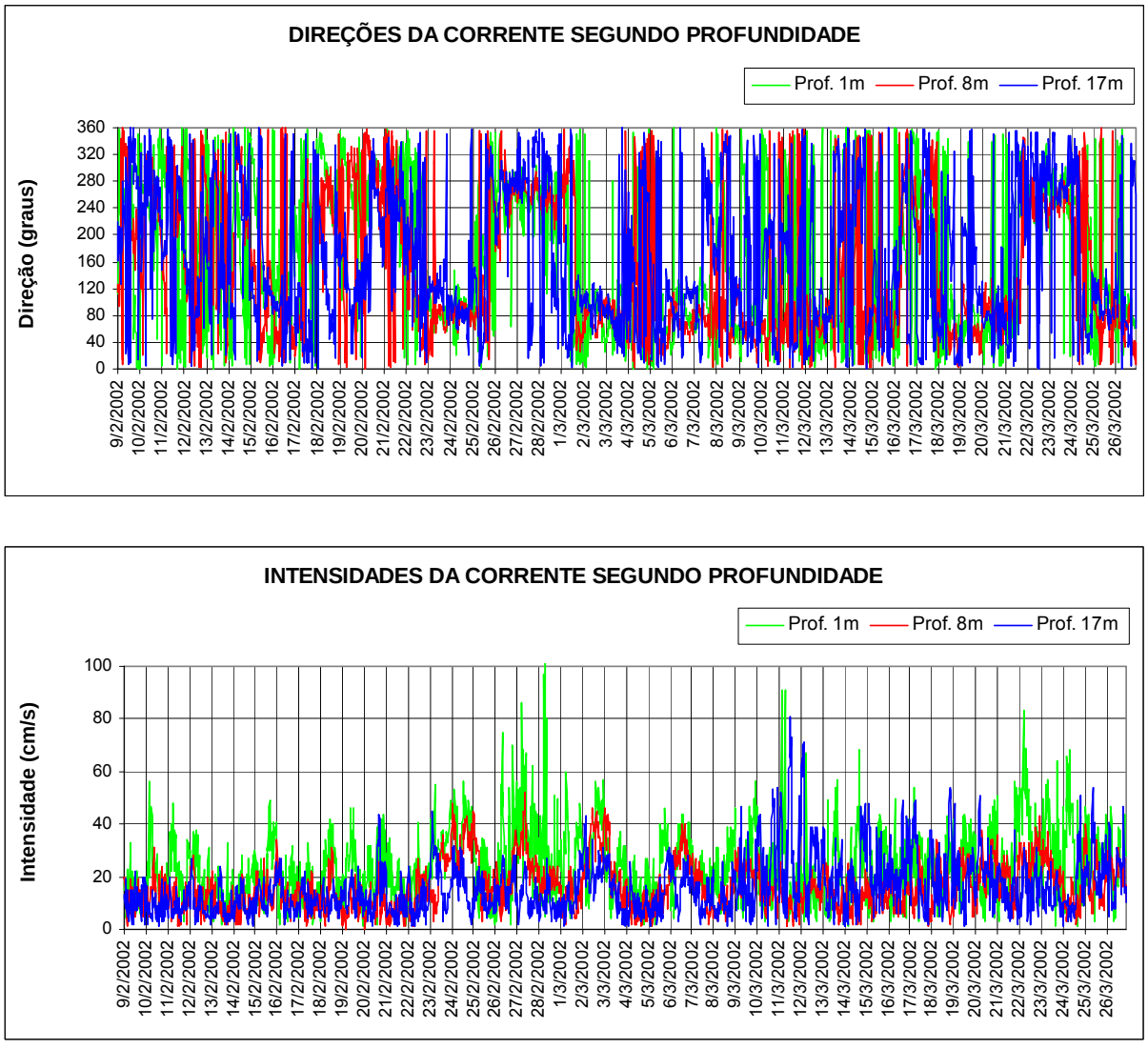


Figura 35 – Dados de medição de correntes em três profundidades (1m, 8m, 17m) – Verão – Ponto ADCP-CODESP – Fonte: CODESP (2002)

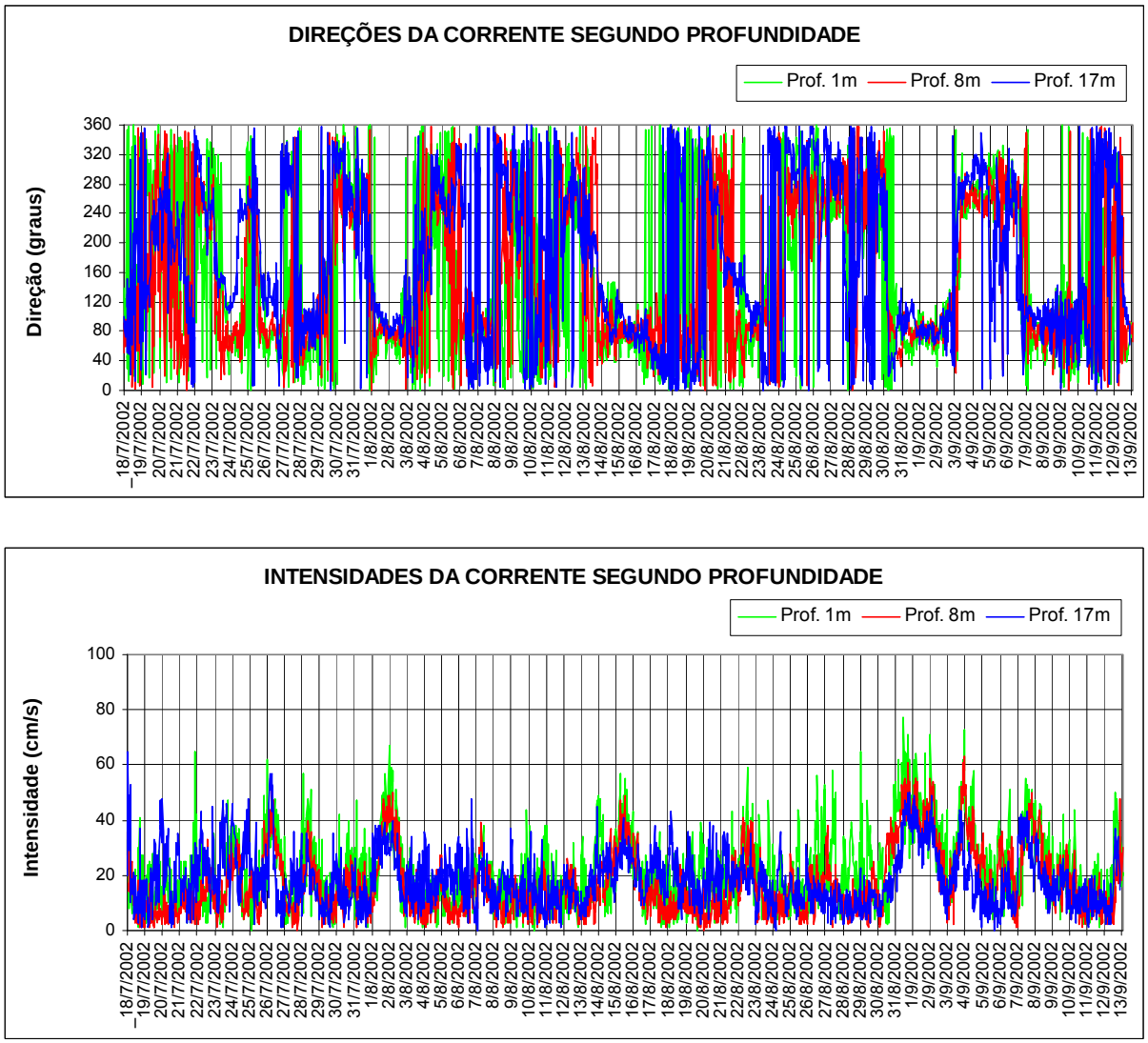


Figura 36 – Dados de medição de correntes em três profundidades (1m, 8m, 17m) – Inverno – Ponto ADCP-CODESP – Fonte: CODESP (2002)

Na Figura 37 e na Figura 38 são apresentadas as Rosas de Correntes para os períodos de verão e inverno de 2002, para a média das correntes na profundidade, para o ponto ADCP-CODESP.

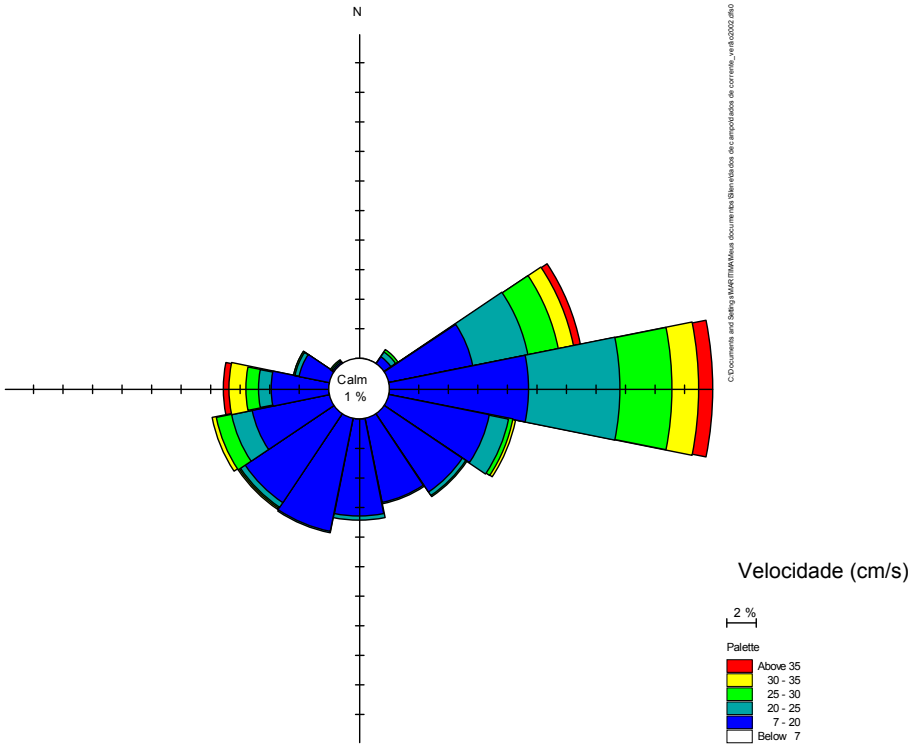


Figura 37 – Rosa das Correntes – Dados de correntes medidos – Verão 2002 – Ponto ADCP-CODESP – Média da Profundidade

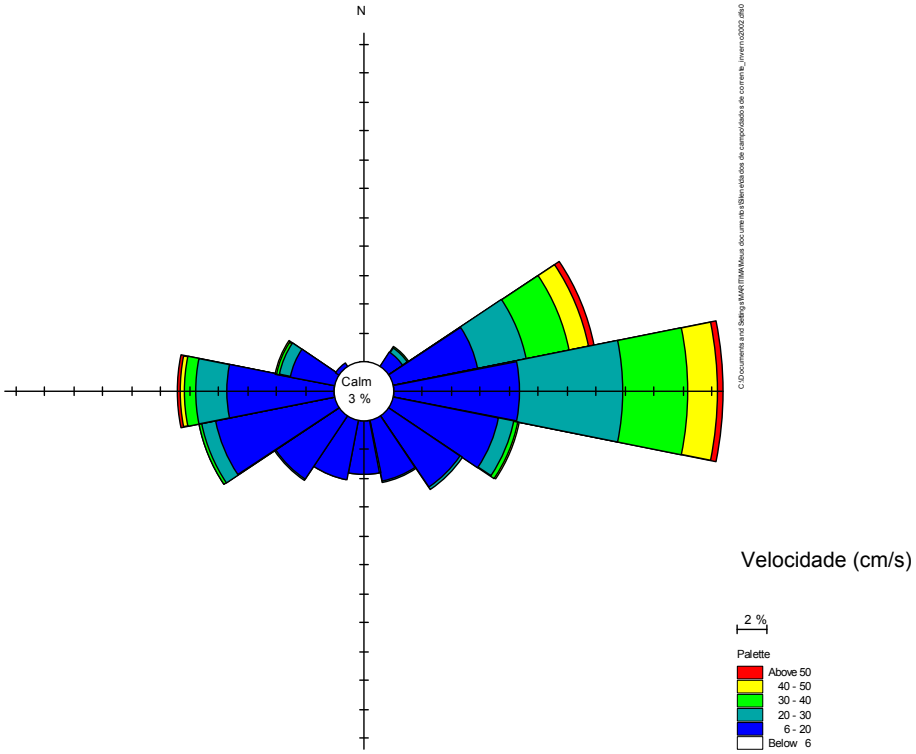


Figura 38 - Rosa das Correntes – Dados de correntes medidos - Inverno 2002 – Ponto ADCP-CODESP – Média na Profundidade

Conforme dados de SABESP (2006), foram feitas medições de correntes com ADCP em ponto na região da Praia Grande (Ponto ADCP-SABESP), sendo que as medições foram feitas de metro em metro em toda a profundidade. As medições foram efetuadas no período de 11/07/2005 a 15/08/2005, no entanto na profundidade de 11m as medições pararam em 30/07/2005. A seguir são apresentados dados de correntes em três profundidades (1m, 5m, 10m):

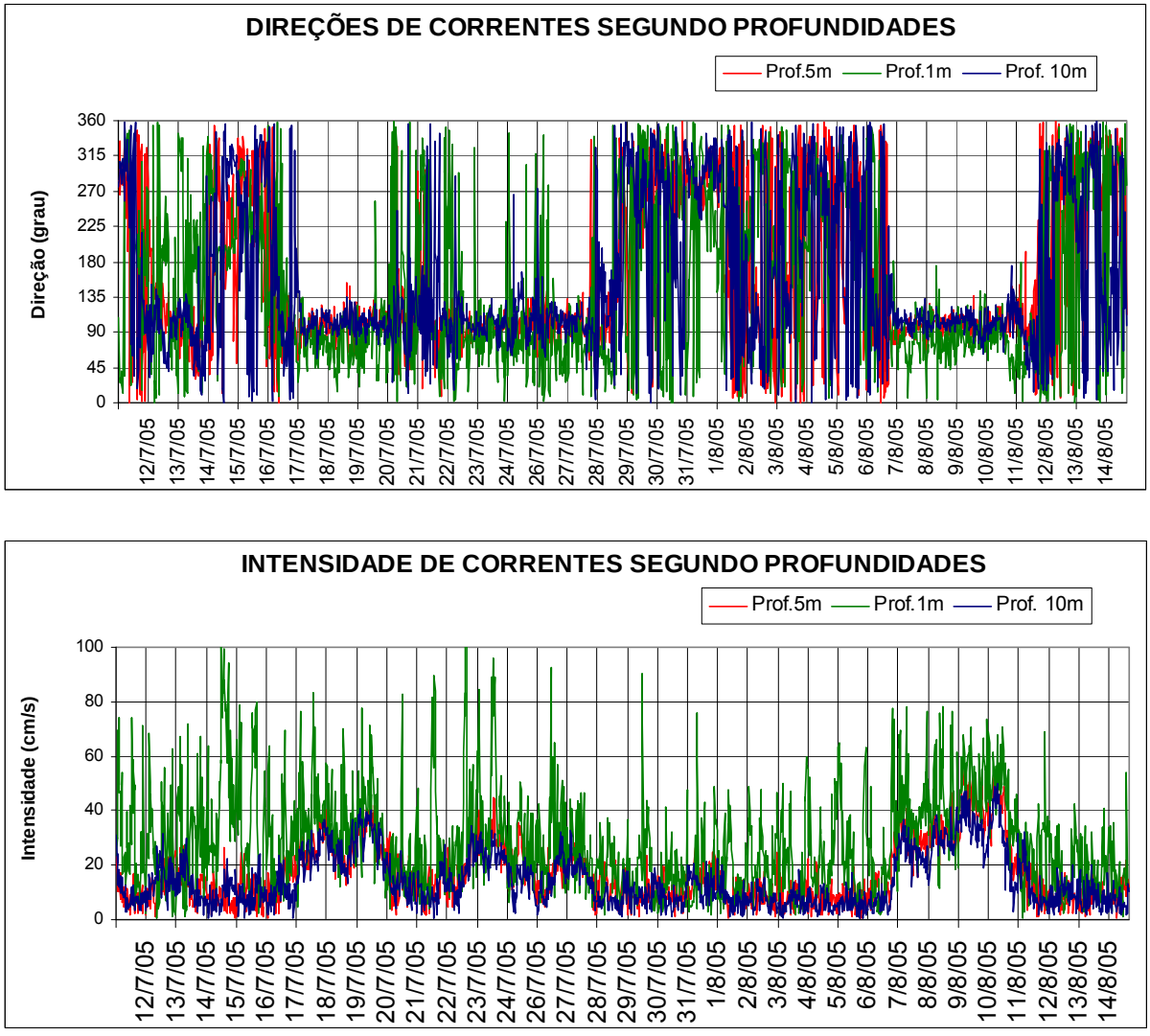


Figura 39 – Dados de medição de correntes em três profundidades (1m, 5m e 10m) – Ponto ADCP-SABESP – Fonte: SABESP (2006)

Na Figura 40 é apresentada a Rosa de Correntes para os períodos de inverno de 2005, para a média das correntes na profundidade, para o ponto ADCP-SABESP.

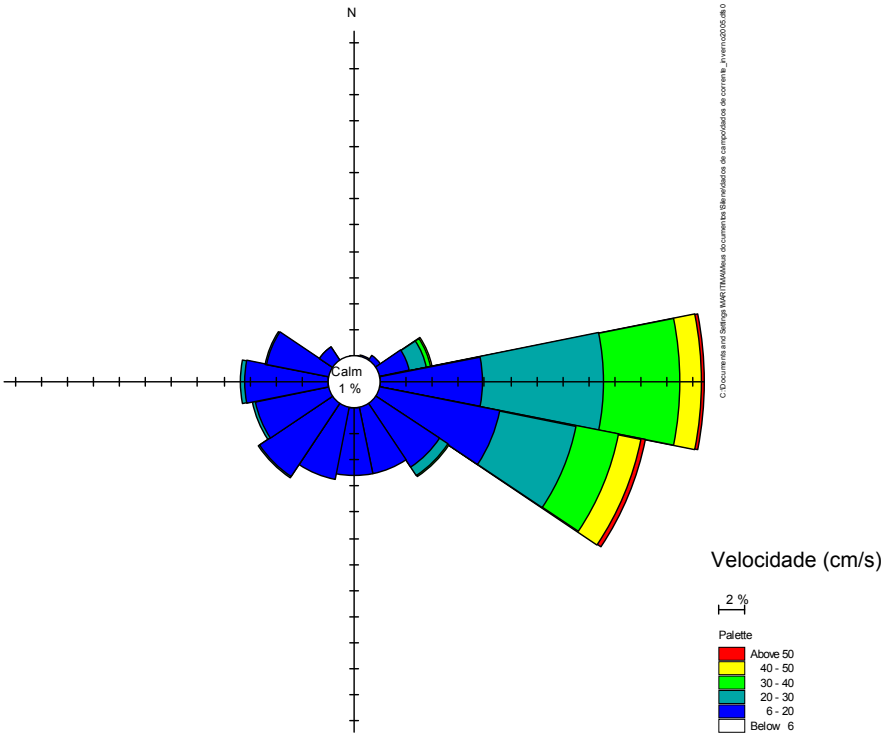


Figura 40 - Rosa das Correntes – Dados de correntes medidos – Inverno 2005 – Ponto ADCP-SABESP – Média na Profundidade

Conforme dados de SABESP (2006), foram também efetuadas medições de correntes em curtos períodos, feitas nos períodos de coleta de amostras para qualidade das águas no Ponto M1, o ponto mais próximo do ponto de lançamento do emissário submarino de Santos / São Vicente (trecho difusor). No entanto, estes dados de medições de correntes são bem mais discretos, pois as medições foram feitas por algumas horas (12 a 13 horas) em determinados dias de medição. São apresentados a seguir os dados de medição para este ponto (Ponto M1-SSV – ver Figura 5).

Tabela 8 - Dados de medição de corrente no ponto de lançamento do emissário submarino de Santos / São Vicente. Fonte: SABESP (2006)

Medição	Hora	DATA	13/07/2005	Hora	DATA	8/10/2005	Hora	DATA	6/1/2006	Hora	DATA	6/3/2006
		VELOC.	DIREÇÕES		VELOC.	DIREÇÕES		VELOC.	DIREÇÕES		VELOC.	DIREÇÕES
		(m/s)	(grau)		(m/s)	(grau)		(m/s)	(grau)		(m/s)	(grau)
Fundo		0.08	270		0.14	220		0.12	80		0.22	345
1/2 água	7:45	0.08	315	7:20	0.16	270	6:53	0.18	50	08:45	0.20	270
Superficie		0.18	245		0.23	225		0.11	295		0.28	225
Fundo		0.09	225		0.15	300		0.10	55		0.20	015
1/2 água	8:15	0.16	0	07:50	0.19	270	07:28	0.15	15	09:15	0.17	240
Superficie		0.13	240		0.19	0		0.10	10		0.25	180
Fundo		0.08	270		0.21	315		0.10	280		0.20	045
1/2 água	8:45	0.07	285	08:20	0.22	280	08:03	0.10	300	09:47	0.25	270
Superficie		0.13	270		0.20	300		0.14	270		0.24	225
Fundo		0.04	310		0.17	190		0.08	120		0.22	345
1/2 água	9:15	0.11	285	08:50	0.23	315	08:30	0.10	320	10:15	0.24	285
Superficie		0.11	240		0.22	315		0.11	225		0.26	210
Fundo		0.08	225		0.19	190		0.08	225		0.18	15
1/2 água	9:45	0.08	330	09:20	0.23	290	08:59	0.11	290	10:45	0.22	270
Superficie		0.07	290		0.24	270		0.10	250		0.26	120
Fundo		0.05	315		0.17	180		0.11	210		0.18	0
1/2 água	10:15	0.07	300	09:50	0.21	290	09:29	0.07	255	11:15	0.23	270
Superficie		0.11	255		0.24	315		0.12	130		0.36	135
Fundo		0.09	325		0.14	50		0.12	165		0.14	15
1/2 água	10:45	0.09	340	10:20	0.20	270	10:00	0.09	290	11:46	0.23	300
Superficie		0.12	225		0.16	45		0.10	125		0.22	225
Fundo		0.08	270		0.16	50		0.17	185		0.14	345
1/2 água	11:15	0.08	0	10:50	0.19	290	10:30	0.11	185	12:15	0.17	315
Superficie		0.14	210		0.20	0		0.12	130		0.23	180
Fundo		0.11	270		0.25	180		0.10	220		0.19	15
1/2 água	11:45	0.09	320	11:20	0.18	160	11:00	0.09	280	12:45	0.19	315
Superficie		0.16	180		0.31	0		0.09	340		0.21	135
Fundo		0.10	200		0.21	180		0.11	255		0.15	45
1/2 água	12:15	0.08	270	11:50	0.18	90	11:30	0.10	260	13:25	0.18	0
Superficie		0.09	240		0.27	45		0.08	60		0.21	315
Fundo		0.07	245		0.23	190		0.11	135		0.21	90
1/2 água	12:45	0.17	290	12:20	0.20	200	12:01	0.14	280	13:45	0.23	15
Superficie		0.08	270		0.23	45		0.09	85		0.22	15
Fundo		0.15	285		0.21	190		0.09	230		0.17	225
1/2 água	13:15	0.09	30	12:50	0.17	270	12:30	0.11	290	14:15	0.15	30
Superficie		0.07	270		0.19	0		0.07	275		0.24	240
Fundo		0.08	345		0.22	225		0.10	240		0.18	45
1/2 água	13:45	0.08	0	13:20	0.17	90	12:59	0.11	105	14:45	0.19	30
Superficie		0.06	315		0.17	225		0.14	105		0.22	180
Fundo		0.06	330		0.18	225		0.13	105		0.17	60
1/2 água	14:15	0.07	15	13:50	0.17	0	13:44	0.10	110	15:15	0.15	15
Superficie		0.13	105		0.28	135		0.14	90		0.19	240
Fundo		0.07	45		0.19	0		0.11	90		0.17	180
1/2 água	14:45	0.09	270	14:20	0.17	100	14:00	0.11	285	15:45	0.15	30
Superficie		0.09	45		0.24	0		0.12	280		0.21	210
Fundo		0.08	45		0.14	135		0.15	280		0.14	240
1/2 água	15:15	0.09	45	14:50	0.17	45	14:31	0.11	285	16:16	0.16	30
Superficie		0.12	285		0.20	0		0.16	80		0.22	225
Fundo		0.12	60		0.13	50		0.18	270		0.16	180
1/2 água	15:45	0.11	40	15:20	0.15	45	15:00	0.14	90	16:45	0.15	330
Superficie		0.15	315		0.20	135		0.15	290		0.20	240
Fundo		0.08	45		0.22	280		0.14	120		0.15	270
1/2 água	16:15	0.12	45	15:50	0.18	45	15:30	0.16	270	17:16	0.18	330
Superficie		0.20	315		0.23	225		0.15	30		0.17	270
Fundo		0.07	130		0.18	270		0.12	150		0.15	190
1/2 água	16:45	0.11	45	16:20	0.14	315	16:00	0.16	90	17:46	0.17	0
Superficie		0.15	305		0.20	270		0.14	300		0.17	240
Fundo		xxx	ss		0.17	270		0.14	125		0.14	240
1/2 água	17:15	0.11	45	16:50	0.18	270	16:30	0.10	90	18:16	0.16	315
Superficie		0.14	315		0.24	90		0.14	315		0.16	260
Fundo		0.10	180		0.23	315		0.13	105		0.16	240
1/2 água	17:45	0.13	45	17:20	0.28	225	17:00	0.10	100	18:46	0.16	330
Superficie		0.15	300		0.20	90		0.22	60		0.16	240
Fundo		0.07	150		0.20	270		0.13	135		0.13	225
1/2 água	18:15	0.09	30	17:50	0.26	25	17:30	0.13	90	19:16	0.17	350
Superficie		0.16	315		0.26	270		0.21	355		0.22	230
Fundo		0.11	225		0.20	270		0.19	155		0.15	225
1/2 água	18:45	0.14	30	18:20	0.22	315	18:00	0.17	225	19:46	0.14	0
Superficie		0.16	290		0.21	315		0.16	345		0.14	240
Fundo		0.10	225		0.18	270		0.18	85		0.19	210
1/2 água	19:15	0.13	35	18:50	0.17	315	18:30	0.12	130	20:17	0.15	350
Superficie		0.16	270		0.12	45		0.14	45		0.17	240
Fundo		0.12	240		0.18	190		0.21	135		0.13	140
1/2 água	19:45	0.13	35	19:20	0.17	190	19:00	0.11	110	20:46	0.16	0
Superficie		0.13	290		0.23	250		0.13	260		0.20	250
Fundo		0.09	300		0.20	270		0.22	190		0.14	180
1/2 água	20:15	0.13	10	19:50	0.21	270	19:30	0.14	270	21:15	0.15	10
Superficie		0.15	270		0.20	300		0.12	80		0.17	245
Fundo		0.13	270		0.17	0						
1/2 água	20:45	0.11	15	20:20	0.17	270						
Superficie		0.16	280		0.20	180						

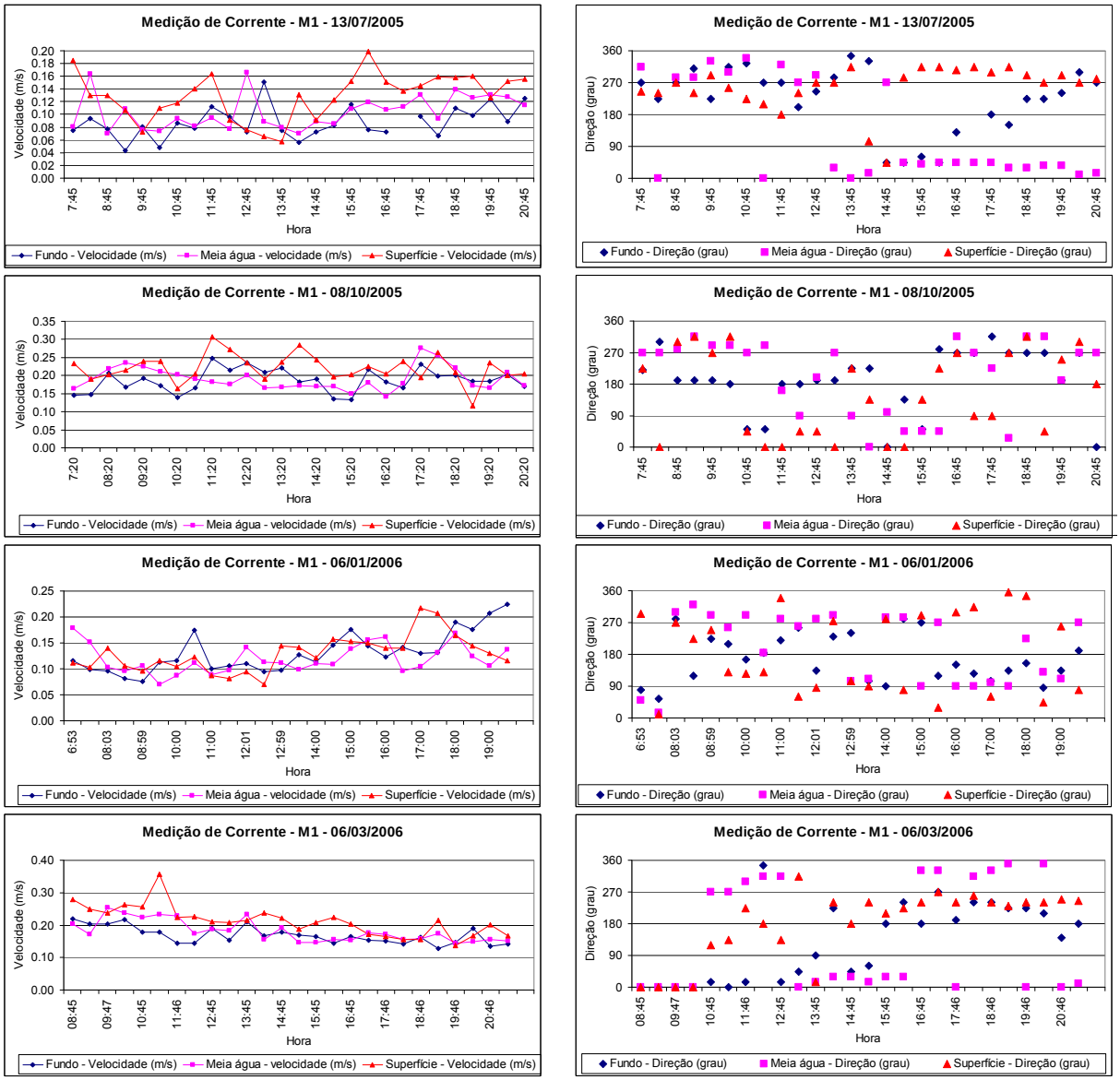


Figura 41 – Gráficos dos Dados de medição de corrente no ponto de lançamento do emissário submarino de Santos / São Vicente. Fonte: SABESP (2006)

7.6 Salinidade e Temperatura

Segundo FUNDESPA (1999), os dados de medição de campo na Baía de Santos mostraram que para o período de inverno de 1998 os intervalos de variação de temperatura e salinidade na superfície foram de 21,6 a 24,2 ^{o}C e de 30,8 a 34,2, respectivamente. Nas proximidades do fundo os intervalos foram de 21,6 a 22,2 ^{o}C para temperatura e de 34,6 a 35,2 para a salinidade.

Durante o período de verão de 1998, devido ao aquecimento sazonal e à maior descarga de água doce no Sistema Estuarino de Santos, a massa de água da Baía

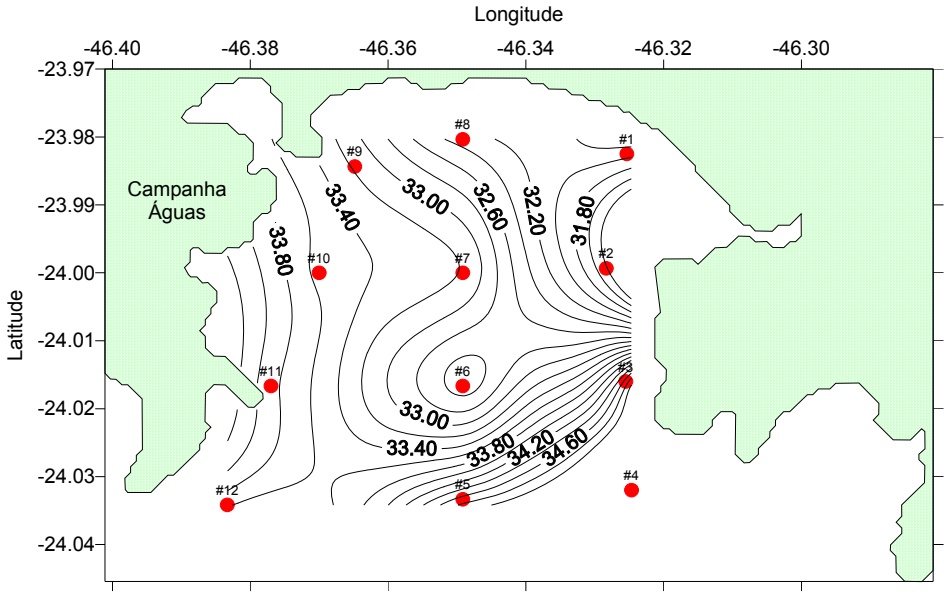
apresentou elevados valores de temperatura e salinidade relativamente baixa. Os intervalos de variação da temperatura na superfície e no fundo foram de 28,2 a 30,2 ^{o}C e de 25,4 a 28,8 ^{o}C, respectivamente. Estes valores estavam associados aos seguintes intervalos de variação da salinidade: de 21,0 a 31,0 e de 31 a 34,6, respectivamente. Os menores valores de salinidade na superfície e no fundo ocorreram em todas as campanhas na parte leste da baía, adjacente à entrada do Canal do Porto. Os maiores valores foram observados ao sul da entrada desse canal e também na parte oeste e central da baía.

Para a região da Praia Grande, as medições foram realizadas nos períodos de dezembro de 1994 e fevereiro de 1995. Campanhas posteriores foram realizadas no período de transição inverno-primavera (setembro, outubro e novembro de 1997) e verão (março de 1998). Os resultados das campanhas mostraram que para o inverno a temperatura variou de 21,0 a 24,2 ^{o}C e a salinidade de 32,6 a 35,5. A coluna d'água apresentou-se pouco estratificada, com diferenças de salinidade e temperatura entre a superfície e fundo, próximas de 1 e 2 ^{o}C, respectivamente. No verão as temperaturas foram maiores que no inverno e variaram nos intervalos de 28,2 a 31,2 ^{o}C e de 23,4 a 27,8 ^{o}C na superfície e fundo, respectivamente. Ainda segundo os autores (Fundespa, op.cit.), devido ao aumento da precipitação no verão a salinidade da superfície decresceu em relação ao período de inverno-primavera, variando no intervalo de 28,1 a 32,0, com os menores valores ocorrendo ao longo da praia, e no fundo, a variação foi de 34 a 35,6. Estes dados estão resumidos na Tabela 9.

Tabela 9 – Dados de medição de campo de salinidade e temperatura – FUNDESPA (1999)

Profundidade	Inverno			
	Santos		Praia Grande	
	Salinidade	Temperatura	Salinidade	Temperatura
Superfície	30,8 a 34,2	21,6 a 24,2 ^{o}C	32,6 a 35,5	21,0 a 24,2 ^{o}C
Fundo	34,6 a 35,2	21,6 a 22,2 ^{o}C	-	-
	Verão			
Superfície	-	28,2 a 30,2 ^{o}C	28,1 a 32	28,1 a 31,2 ^{o}C
Fundo	31,4 a 34,6	25,4 a 28,8 ^{o}C	34 a 35,6	23,4 a 27,8 ^{o}C

A figura a seguir ilustra a distribuição espacial da salinidade de fundo na Baía de Santos, para o período de verão de 1998.



Fonte: Fundespa, 1999

Figura 42 - Distribuição da salinidade no fundo da Baía de Santos - Verão de 1998

Os dados referentes às medições de salinidade e temperatura constantes do monitoramento de 2005 na região de Santos / São Vicente e Praia Grande, conforme Sabesp (2006) são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Dados de medição de campo de salinidade e temperatura – SABESP (2006)

Profundidade	Inverno			
	Santos		Praia Grande	
	Salinidade	Temperatura	Salinidade	Temperatura
Superfície	32,8 a 35,3	22,6 a 23,3 °C	35,35 a 35,85	22,2 a 23,15 °C
Fundo	35,9 a 36,7	22,8 a 23,0 °C	35,8 a 36,8	22,7 a 22,8 °C
	Verão			
Superfície	31,4 a 34,6	24,4 a 29,5 °C	33,5 a 34,7	27,0 a 29,85 °C
Fundo	34,8 a 36,2	24,45 a 27,8 °C	34,7 a 36,7	22,3 a 28,6 °C

A figura a seguir ilustra a distribuição de salinidade e temperatura (superfície e fundo) para a área em torno do ponto de lançamento do emissário de Santos / São Vicente, para o período de inverno de 2005.

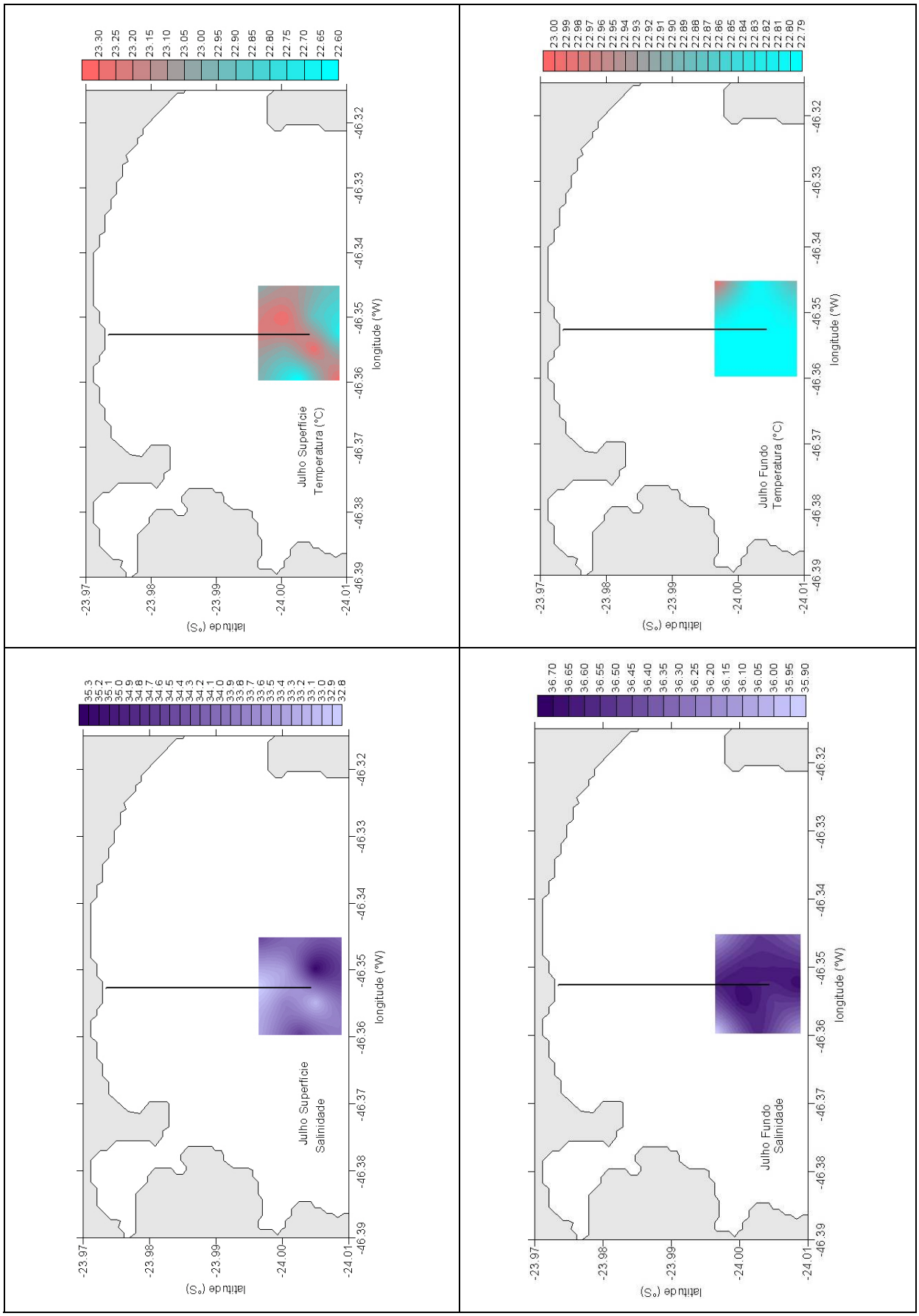


Figura 43 – Distribuição da salinidade e temperatura (superfície e fundo) – Campanha de Julho de 2005 – Inverno – Fonte: SABESP, 2006

Por não estarem disponíveis os dados de salinidade e temperatura no período de 2002, foram adotados para as simulações com o modelo Delft3D, valores constantes de temperatura e salinidade, escolhidos através de média aritmética entre os valores máximos e mínimos para os dois conjuntos de dados e para as duas regiões (Santos e Praia Grande).

Optou-se por utilizar também os dados da Praia Grande, porque os de Santos só consideram a baía, sendo que a região simulada pelo Delft3D abrange a Baía de Santos e região adjacente mais ao largo.

Assim, para os períodos de verão e inverno os valores de salinidade e temperatura utilizados são apresentados a seguir:

Tabela 11 – Valores de salinidade e temperatura utilizados nas simulações com o Delft3D

Verão		Inverno	
Salinidade	Temperatura	Salinidade	Temperatura
32,4	28,6 ºC	34,9	22,7 ºC

8 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

8.1 Simulações com o MIKE 21

8.1.1 Simulações de Calibração

Conforme apresentado no capítulo de metodologia (Capítulo 6 - METODOLOGIA), foram considerados os parâmetros de calibração utilizados em Baptistelli (2003). No entanto, foram efetuadas simulações preliminares de validação dos parâmetros utilizados, as quais apresentaram resultados semelhantes aos obtidos no trabalho op. Citado. Nas simulações com o MIKE 21, nesta Tese, procurou-se aferir parâmetros e situações não estudas em Baptistelli (2003). Para tanto foram testadas três diferentes grades batimétricas, condições de contornos tipo "transfer boundary" e distribuição temporal e espacial dos dados de vento. Além disso, foram testadas a elevação da superfície com a variação astronômica, e posteriormente, a elevação da superfície considerando o vento remoto, através de resultados de simulações de larga escala com o POM. Sendo que, os dados de vento utilizados foram os do NCEP. Foi também testado o uso do vento local na grade do Estuário e Baía de Santos. Todas estas simulações preliminares são discutidas no Capítulo 9.

Na Figura 44 são apresentados gráficos de simulações preliminares, que comparam resultados utilizando somente a elevação da superfície com a variação astronômica e resultados de simulação somando-se a elevação da superfície a partir da simulação de larga escala fornecida pelo POM. Os dados de vento do NCEP com variação temporal e espacial foram considerados em ambas as simulações. Os gráficos são divididos em velocidade, direção, componente x (componente "u" do vetor velocidade - E-W) e componente y (componente "v" do vetor velocidade – N-S). São apresentados gráficos para os valores da média das velocidades na profundidade. Para estas comparações, nas séries temporais dos dados de medição de campo foi aplicado um filtro de médias móveis (média harmônica), equivalente a 5 horas. Este "alisamento" dos dados teve o objetivo de reduzir a variabilidade de alta freqüência observada nos dados de medição de campo.

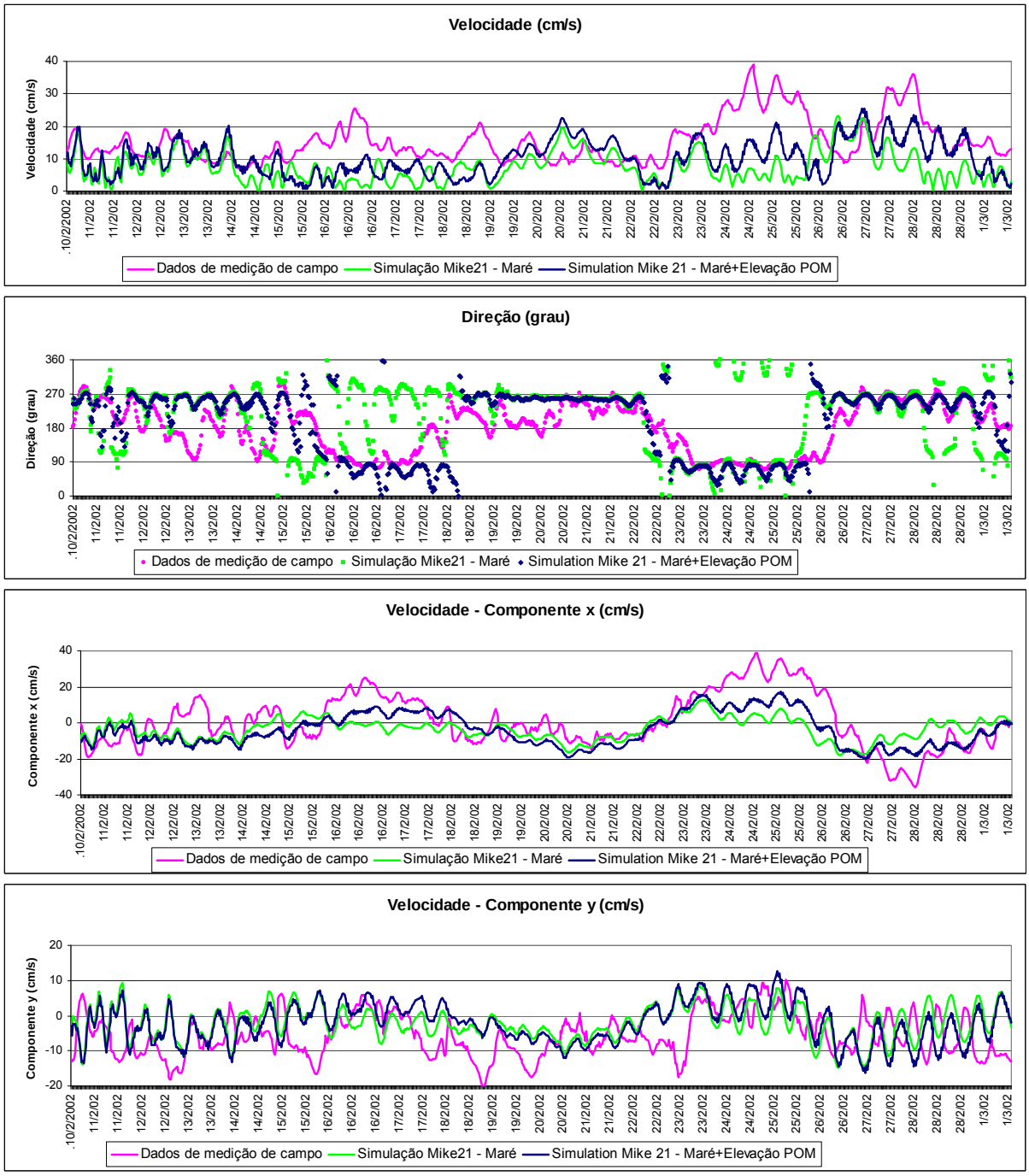


Figura 44 - Comparação entre resultados da simulação com o MIKE 21 (Grade Meso-escala) – Simulação com Maré e Simulação com Maré + Elevação POM - Verão 2002 – Ponto ADCP-CODESP

Na Figura 45 são apresentados os gráficos de comparação entre os resultados das simulações e as medições de campo, com relação as correntes. Foram considerandos o vento NCEP e simulações considerando o vento NCEP mais o vento local.

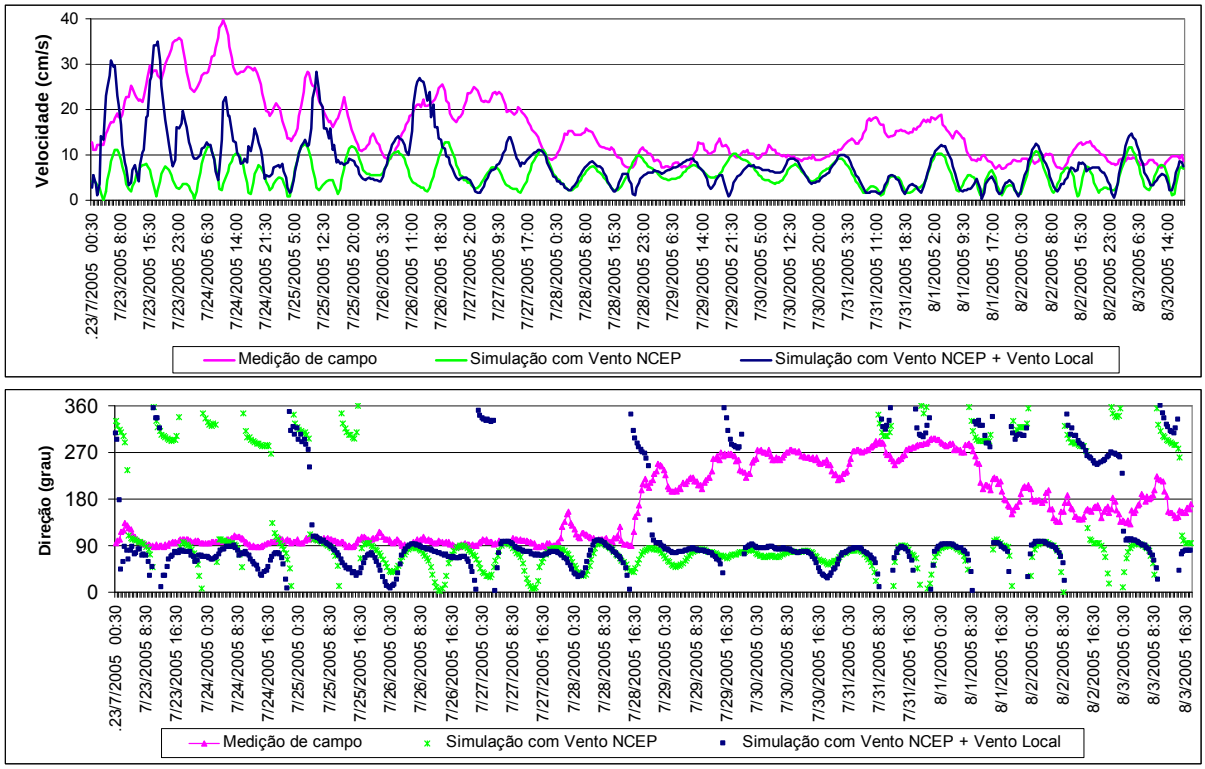


Figura 45 - Comparação entre resultados da simulações com o MIKE 21 (Grade Santos) – Simulações com Vento NCEP e Simulações com Vento NCEP + Vento Local – Inverno 2005 – Ponto ADCP-SABESP

8.1.2 Elevação da Superfície

Na Figura 46 são apresentados os gráficos de comparação entre os resultados extraídos da simulação e os dados de medição de campo (Ponto marégrafo Ilha das Palmas) para a elevação da superfície (maré), para os três períodos simulados.

Os gráficos de dispersão dos valores de elevação da superfície das simulações com o MIKE 21 versus os valores de observação de campo são apresentados na Figura 47. Nestes gráficos são traçadas as linhas de tendência de regressão linear com intersecção em zero. Para cada período são dados as equações da reta e o R-quadrado, os quais correspondem a um valor de coeficiente de correlação, quais sejam: 0,91 para inverno, 0,83 para o verão de 2002 e 0,88 para o inverno de 2005.

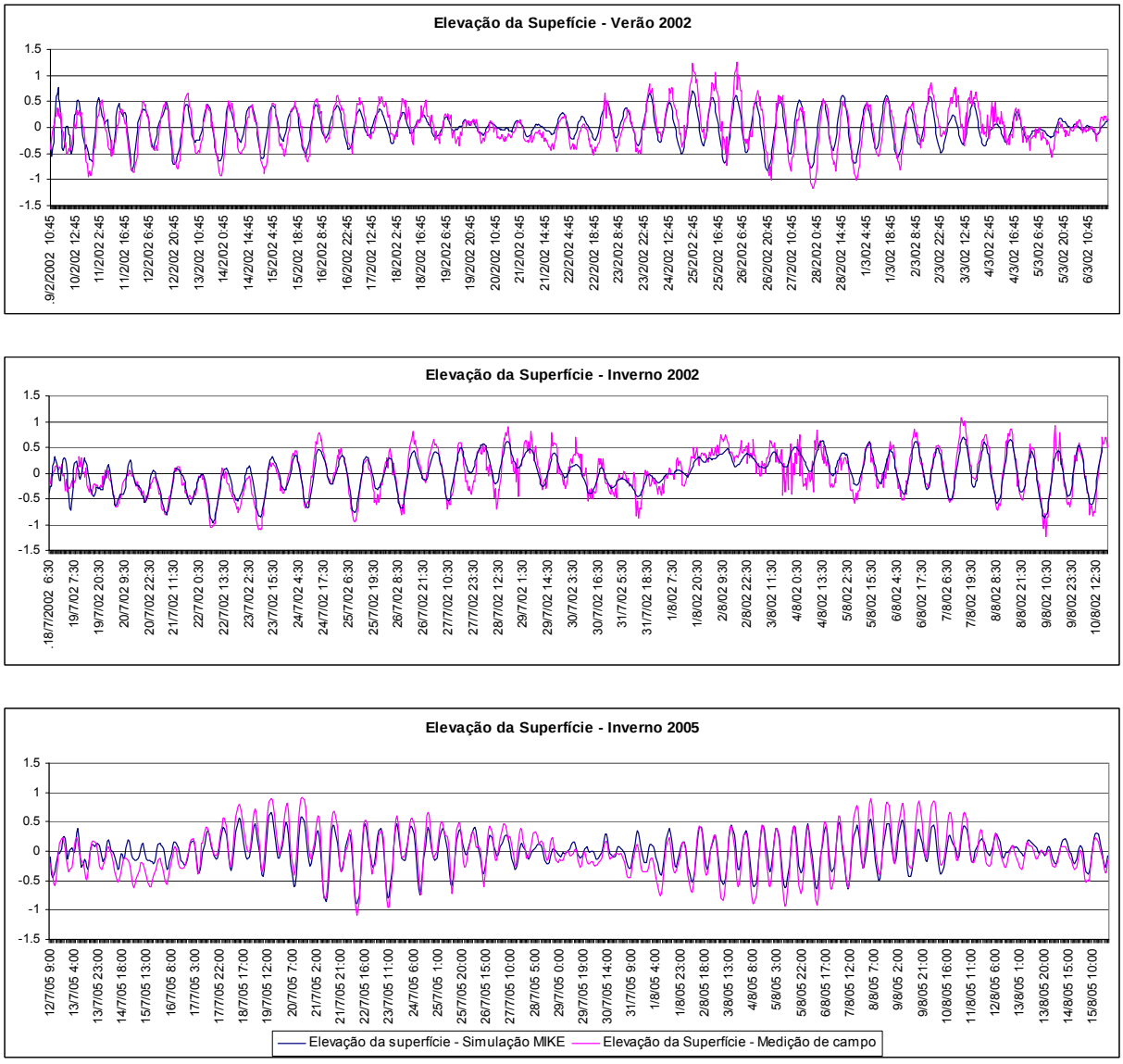


Figura 46 – Comparação de valores de elevação da superfície entre a Simulação MIKE 21 e Observações de Campo

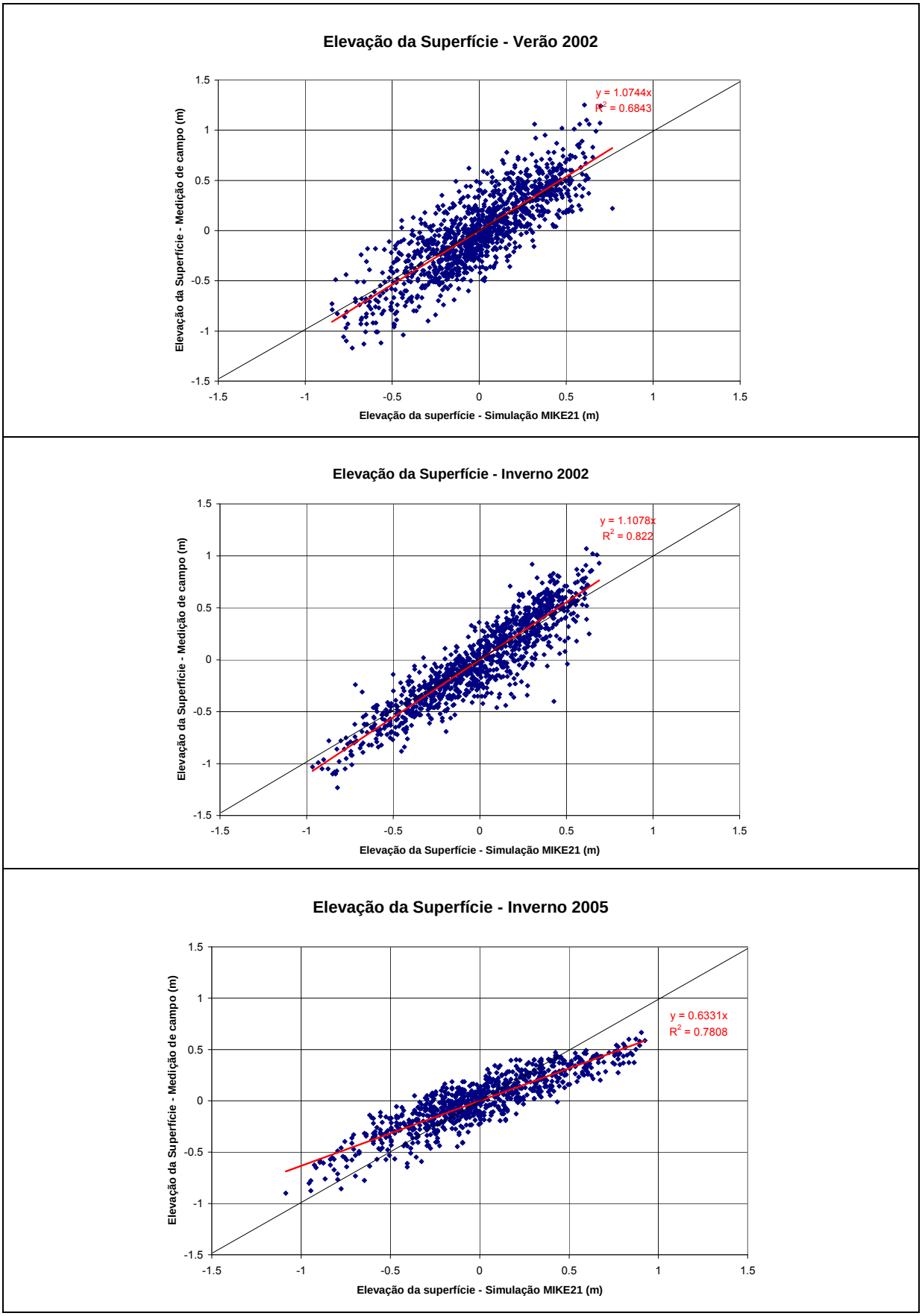


Figura 47 – Gráficos de dispersão entre os valores de elevação da superfície entre a Simulação MIKE 21 e Observações de Campo

8.1.3 Resultados das Simulações de Meso-escala - Correntes

Na seqüência (Figura 48, Figura 49 e Figura 50) são apresentados os gráficos de comparação entre os resultados das simulações e as medições de campo, com relação às correntes. Os gráficos são divididos em velocidade, direção, componente x (componente “u” do vetor velocidade - E-W) e componente y (componente “v” do vetor velocidade – N-S). São apresentados gráficos para os valores da média das velocidades na profundidade. Para estas comparações, nas séries temporais dos dados de medição de campo foi aplicado um filtro de médias móveis (média harmônica), equivalente a 5 horas. Este “alisamento” dos dados teve o objetivo de reduzir a variabilidade de alta freqüência observada nos dados de medição de campo.

Verão 2002

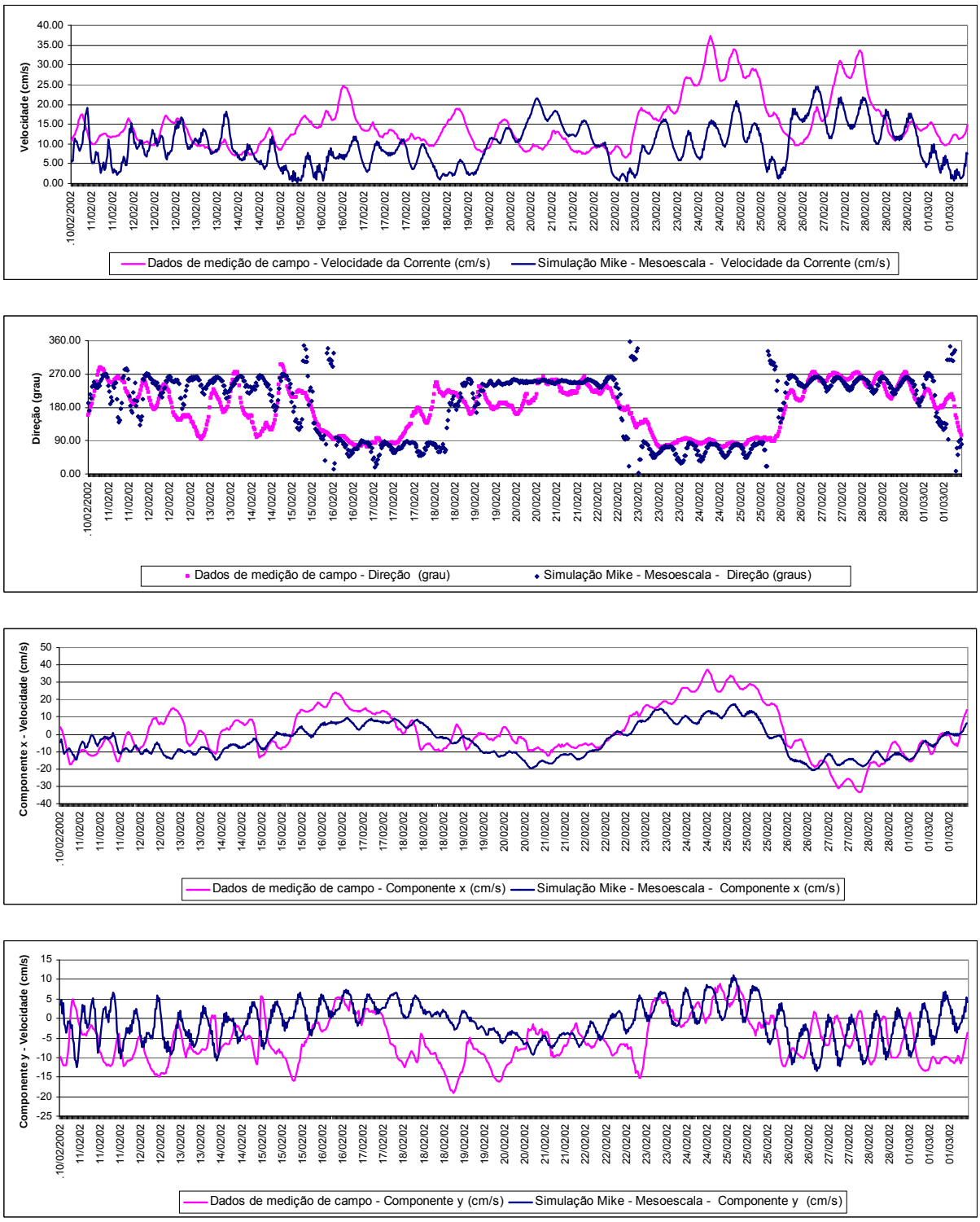


Figura 48 - Comparação entre dados de correntes medidos em campo e resultados da simulação com o MIKE 21 (Grade Meso-escala) – Ponto ADCP-CODESP – Verão 2002 – Velocidades Médias

Figura 49 - Comparação entre dados de correntes medidos em campo e resultados da simulação com o MIKE 21 (Grade Meso-escala) – Ponto ADCP-CODESP – Inverno 2002 – Velocidades Médias

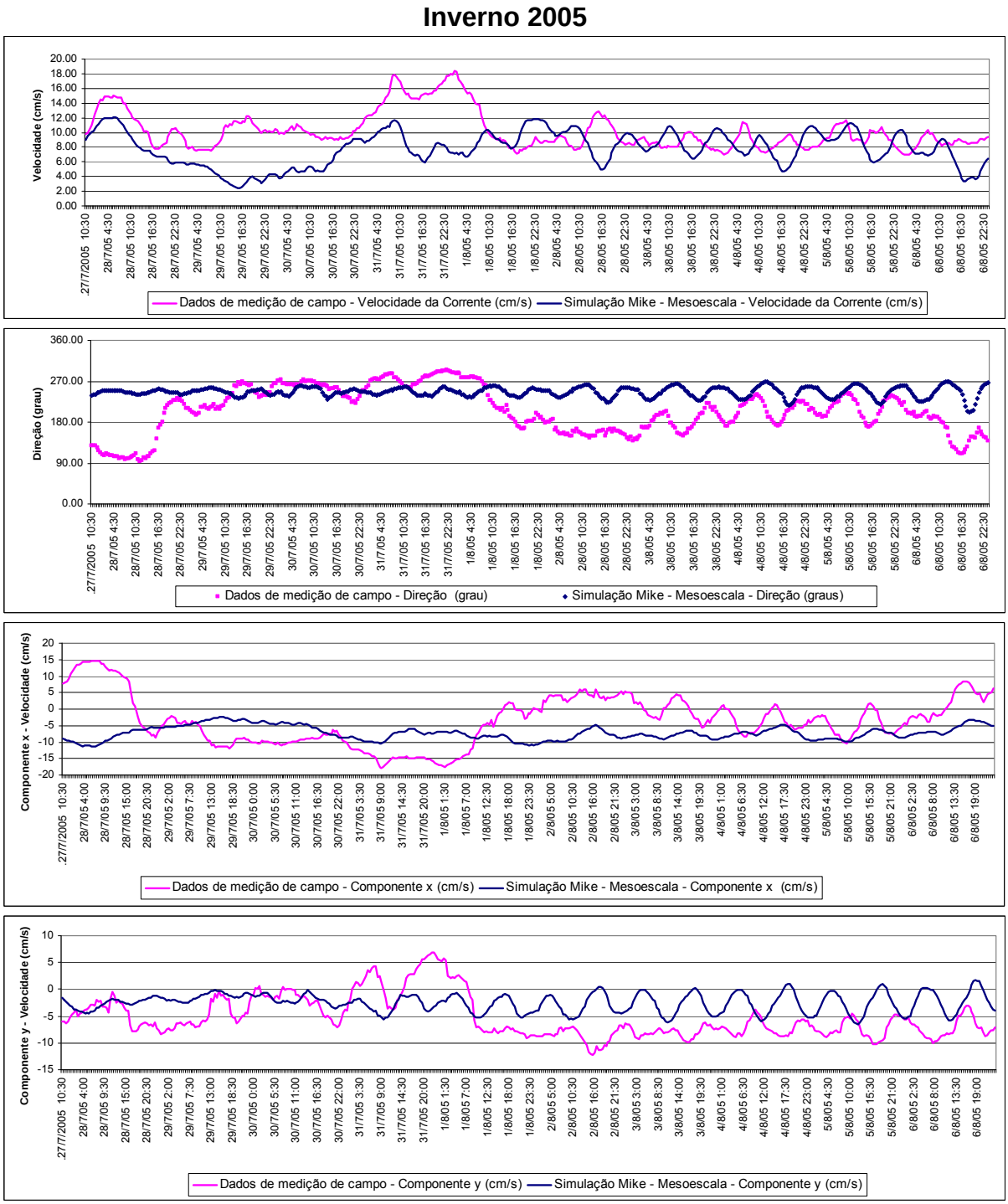


Figura 50 - Comparação entre dados de correntes medidos em campo e resultados da simulação com o MIKE 21 (Grade Meso-escala) – Ponto ADCP-CODESP – Inverno 2005 – Velocidades Médias

Para a visualização da distribuição espacial das correntes, a seguir são apresentados mapas de correntes gerados na grade de meso-escala. Os mapas de correntes são acompanhados por ilustração do vento atuante nos horários que antecedem a situação de correntes apresentada (ventos NCEP).

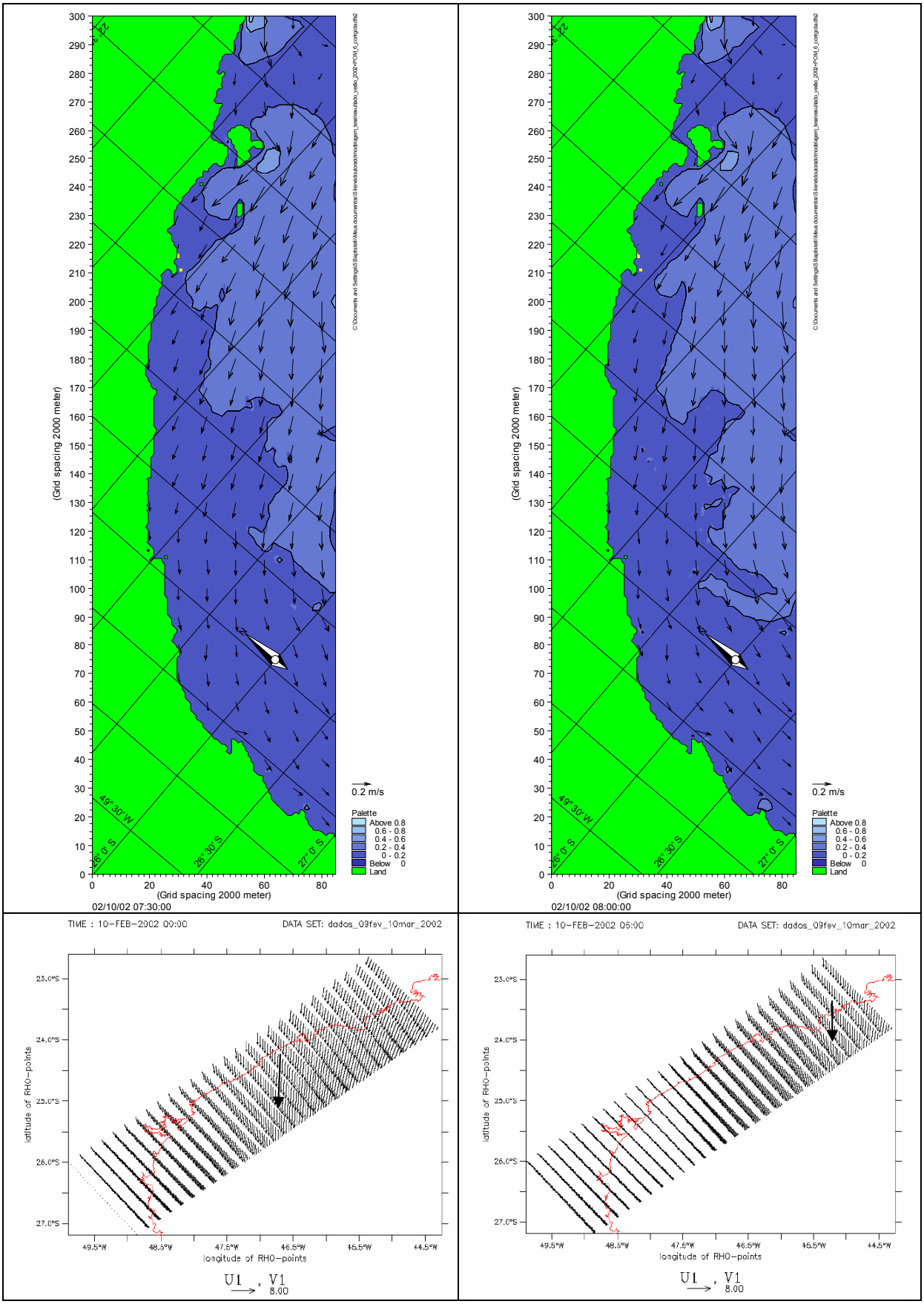


Figura 51 - Resultado da simulação do Verão de 2002 - MIKE 21 – Mapas de correntes – Grade Meso-escala - (10/02/02 – 7:30 h e 8:00 h – Sizígia – Vazante)

Obs.: As setas maiores foram inseridas nos mapas de vento para auxiliar na visualização do sentido do vento, visto que a visualização espacial fica prejudicada nas figuras, por causa da definição das mesmas.

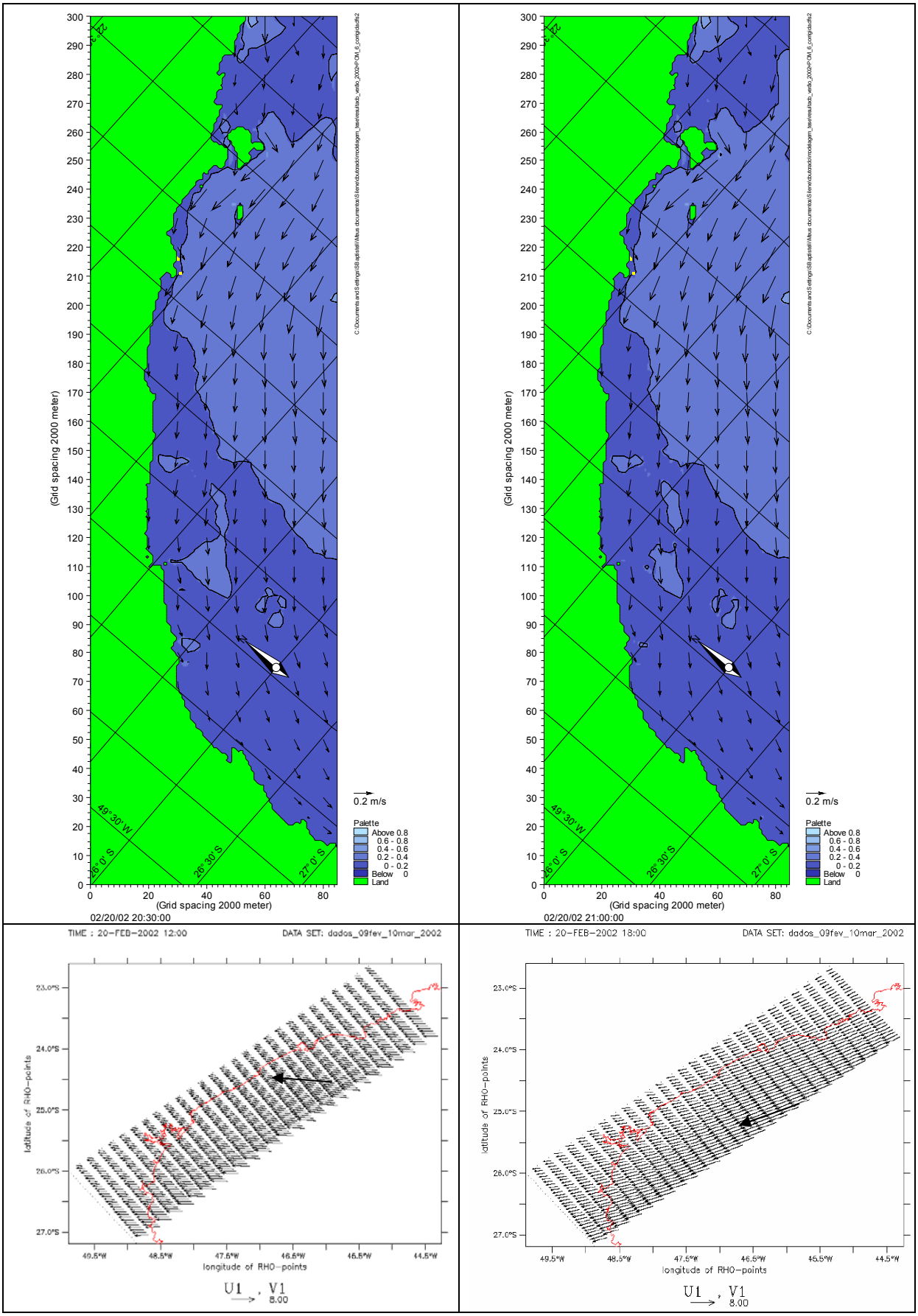


Figura 52 - Resultado da simulação do Verão de 2002 - MIKE 21 – Mapas de correntes – Grade Meso-escala - (20/02/02 – 20:30 h e 21:00 h – Quadratura – Enchente)

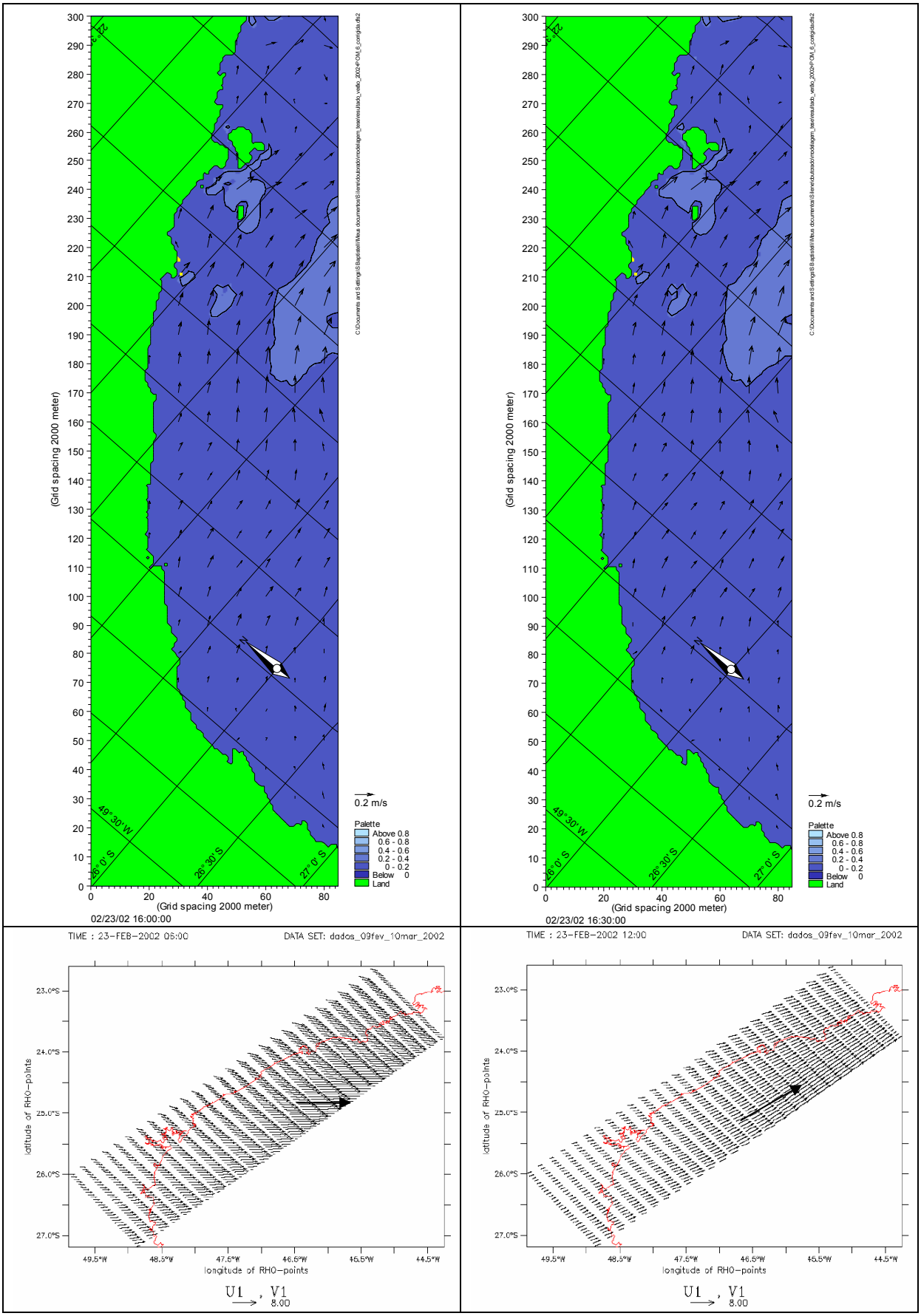


Figura 53 - Resultado da simulação do Verão de 2002 - MIKE 21 – Mapas de correntes – Grade Meso-escala - (23/02/02 – 16:00 h e 16:30 h – Sizígia – Vazante)

A seguir são apresentados mapas de correntes referentes ao período de Inverno de 2005 para a meso-escala.

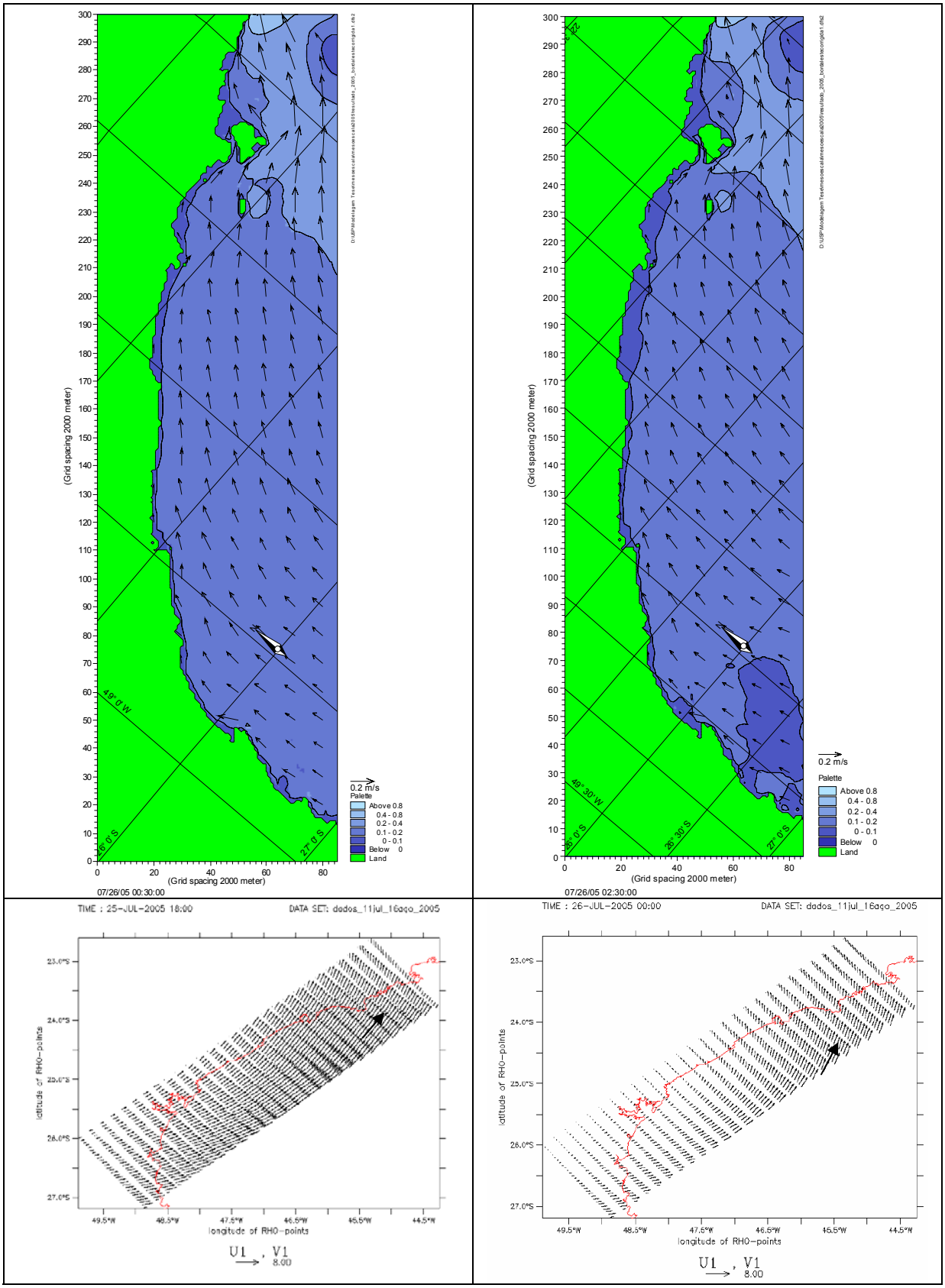


Figura 54 - Resultado da simulação do Inverno de 2005 - MIKE 21 – Mapas de correntes – Grade Meso-escala - (26/07/05 – 00:30 h e 2:30 h – Sizígia – Vazante)

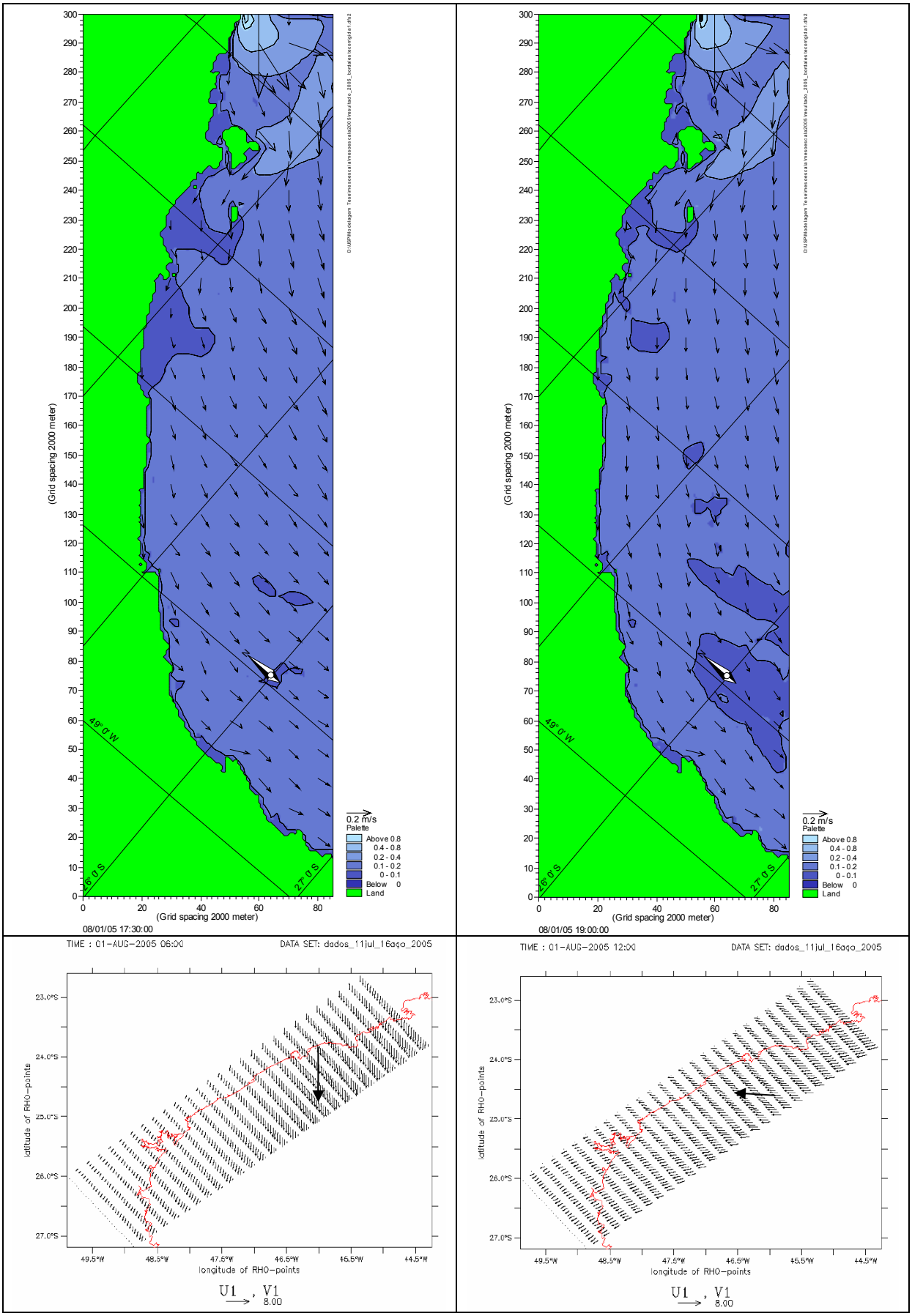


Figura 55 - Resultado da simulação do Inverno de 2005 - MIKE 21 – Mapas de correntes – Grade Meso-escala - (1/8/05 – 17:30 h e 19:00 h – Quadratura – Enchente)

8.1.4 Resultados das Simulações da Baixada Santista - Correntes

Na seqüência são apresentados os gráficos de comparação das correntes entre os resultados das simulações e as medições de campo. Estes resultados foram extraídos das simulações efetuadas com a grade da Baixada Santista. Os gráficos são divididos em velocidade, direção, componente x (componente “u” do vetor velocidade - E-W) e componente y (componente “v” do vetor velocidade – N-S). São apresentados gráficos para os valores da média das velocidades na profundidade. Para estas comparações, nas séries temporais dos dados de medição de campo foi aplicado um filtro de médias móveis (média harmônica), equivalente a 5 horas. Este “alisamento” dos dados teve o objetivo de reduzir a variabilidade de alta freqüência observada nos dados de medição de campo.

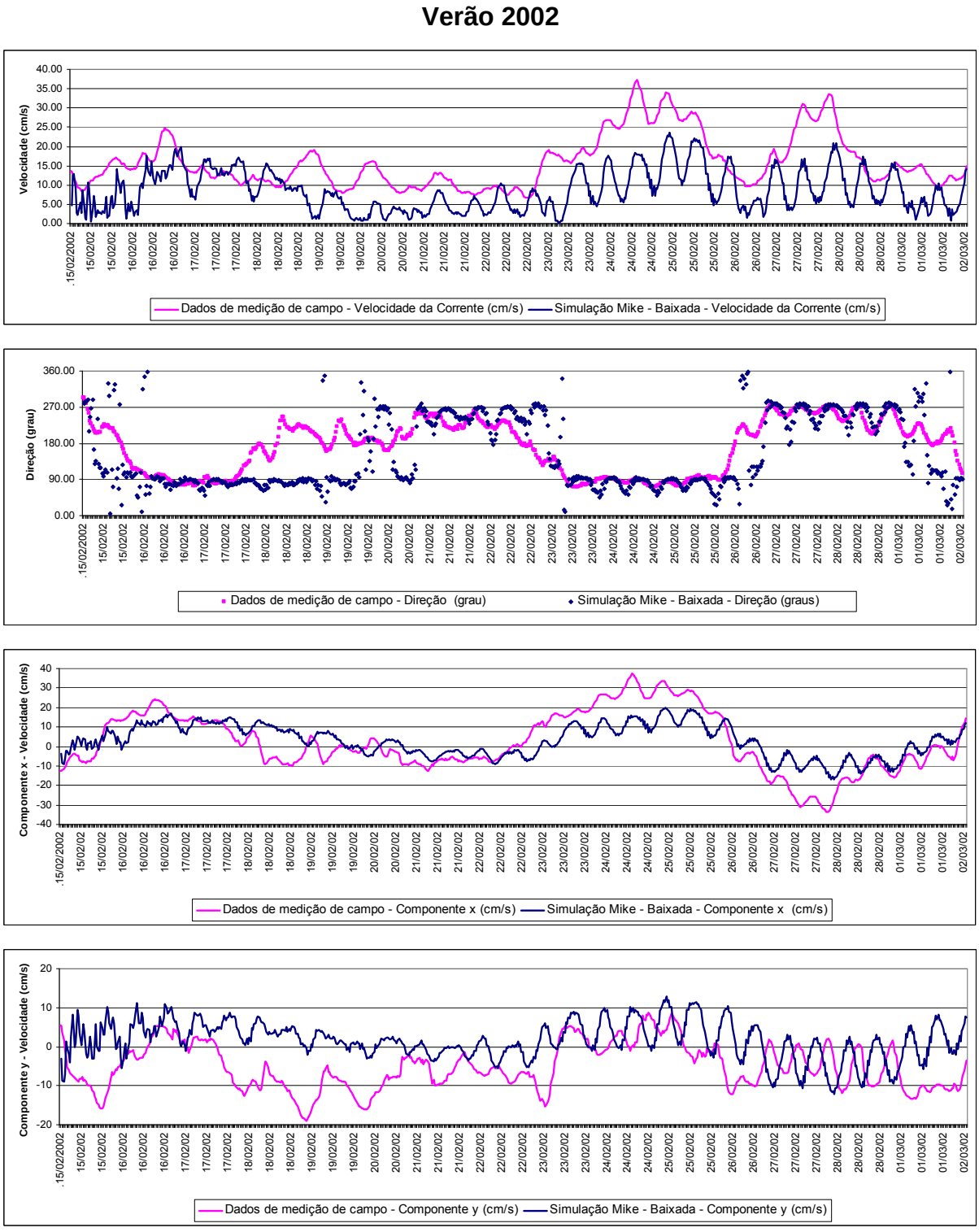


Figura 56 - Comparação entre dados de correntes medidos em campo e resultados da simulação com o MIKE 21 (Grade Baixada)- Ponto ADCP-CODESP – Verão 2002 – Velocidades Médias

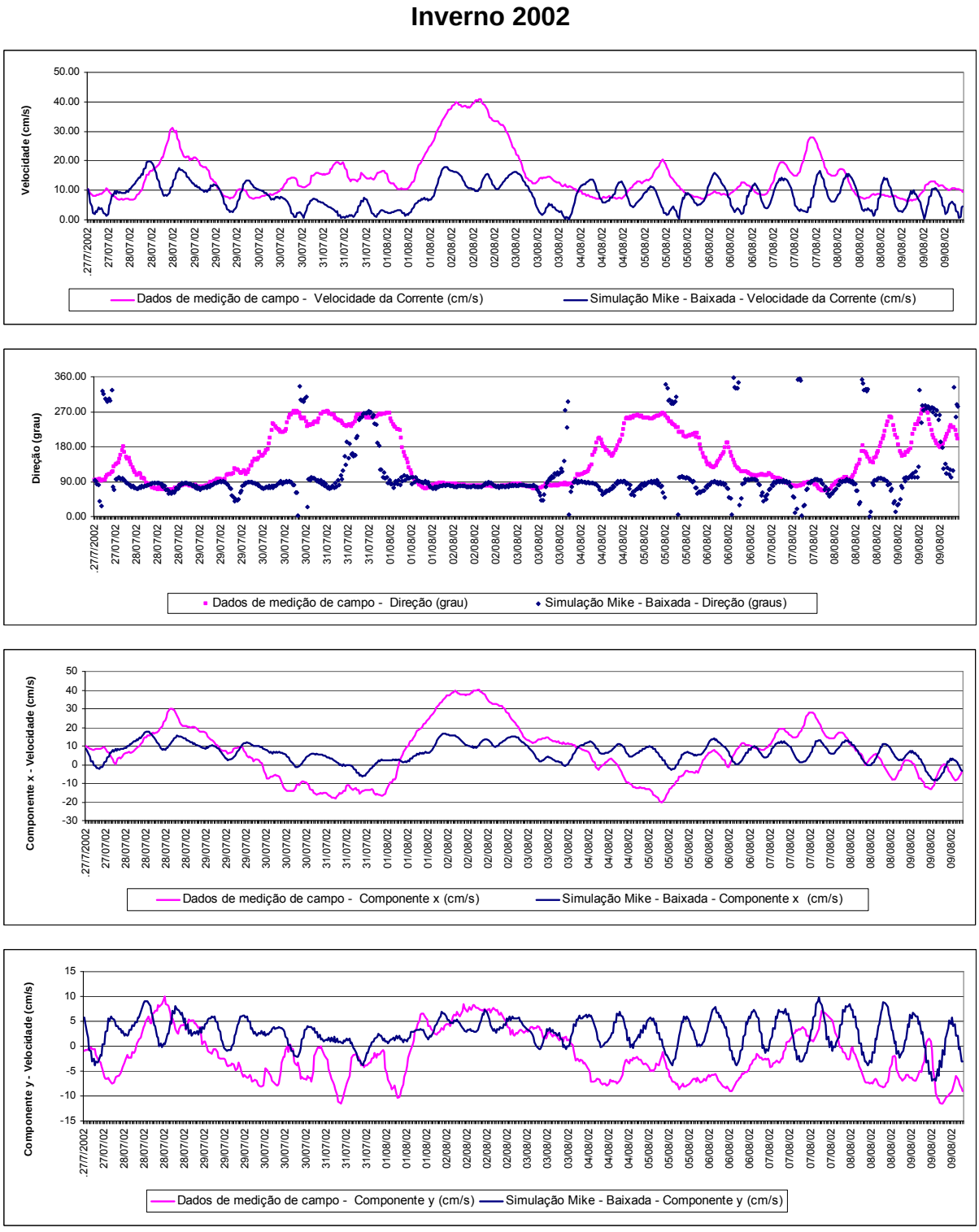


Figura 57 - Comparação entre dados de correntes medidos em campo e resultados da simulação com o MIKE 21 (Grade Baixada) – Ponto ADCP-CODESP – Inverno 2002 – Velocidades Médias

Para a visualização espacial dos resultados são apresentados, a seguir, mapas de correntes para alguns instantes dos períodos simulados. Os mapas de correntes

são acompanhados por ilustração do vento atuante nos horários que antecedem a situação de corrente apresentada (ventos NCEP).

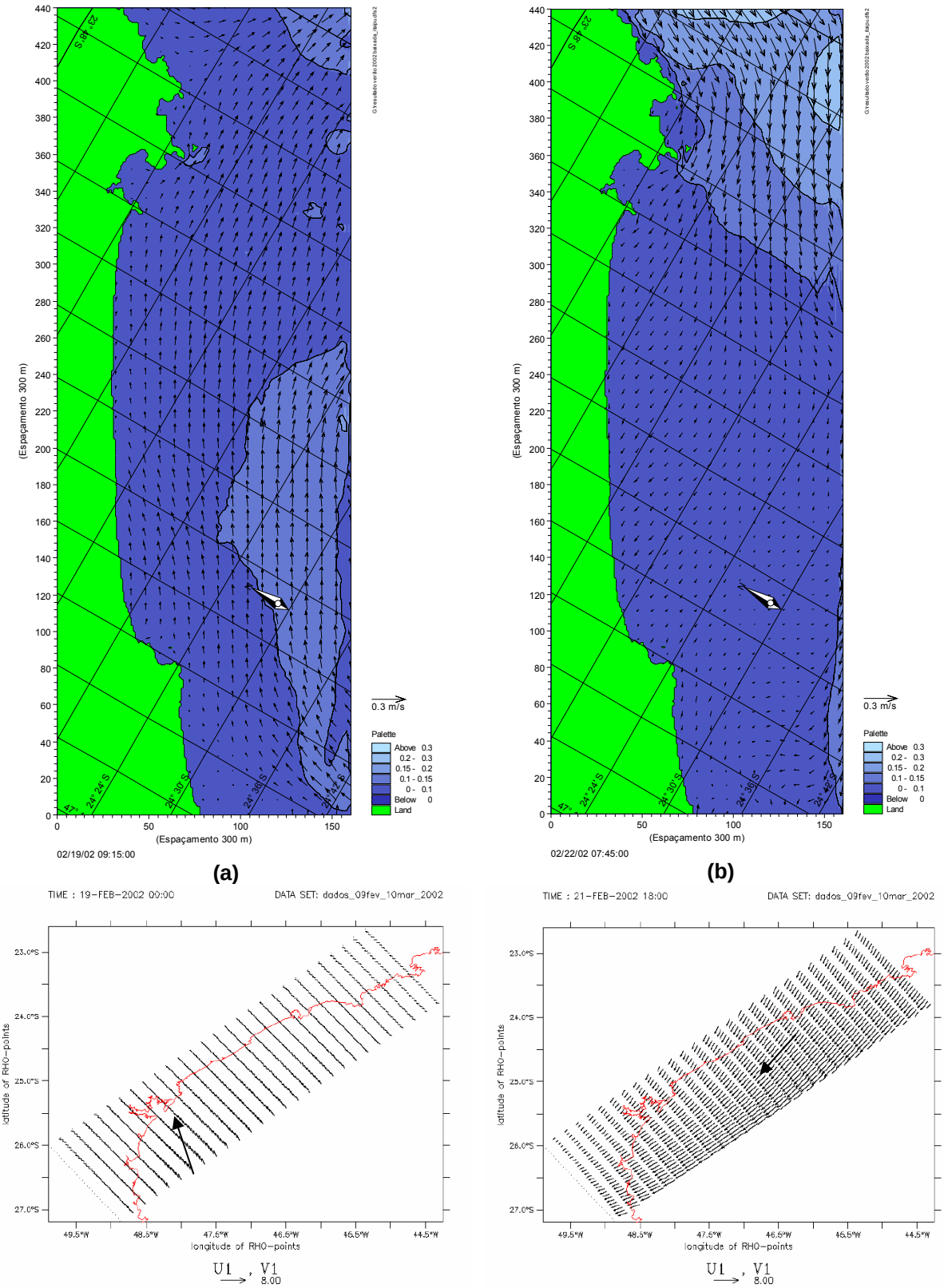


Figura 58 - Resultado da simulação do Verão de 2002 - MIKE 21 – Mapas de correntes – Grade Baixada – (a) 19/02/02 – 9:15 h – Quadratura – Vazante (b) 22/02/2002 – 7:45 h - Quadratura – Enchente

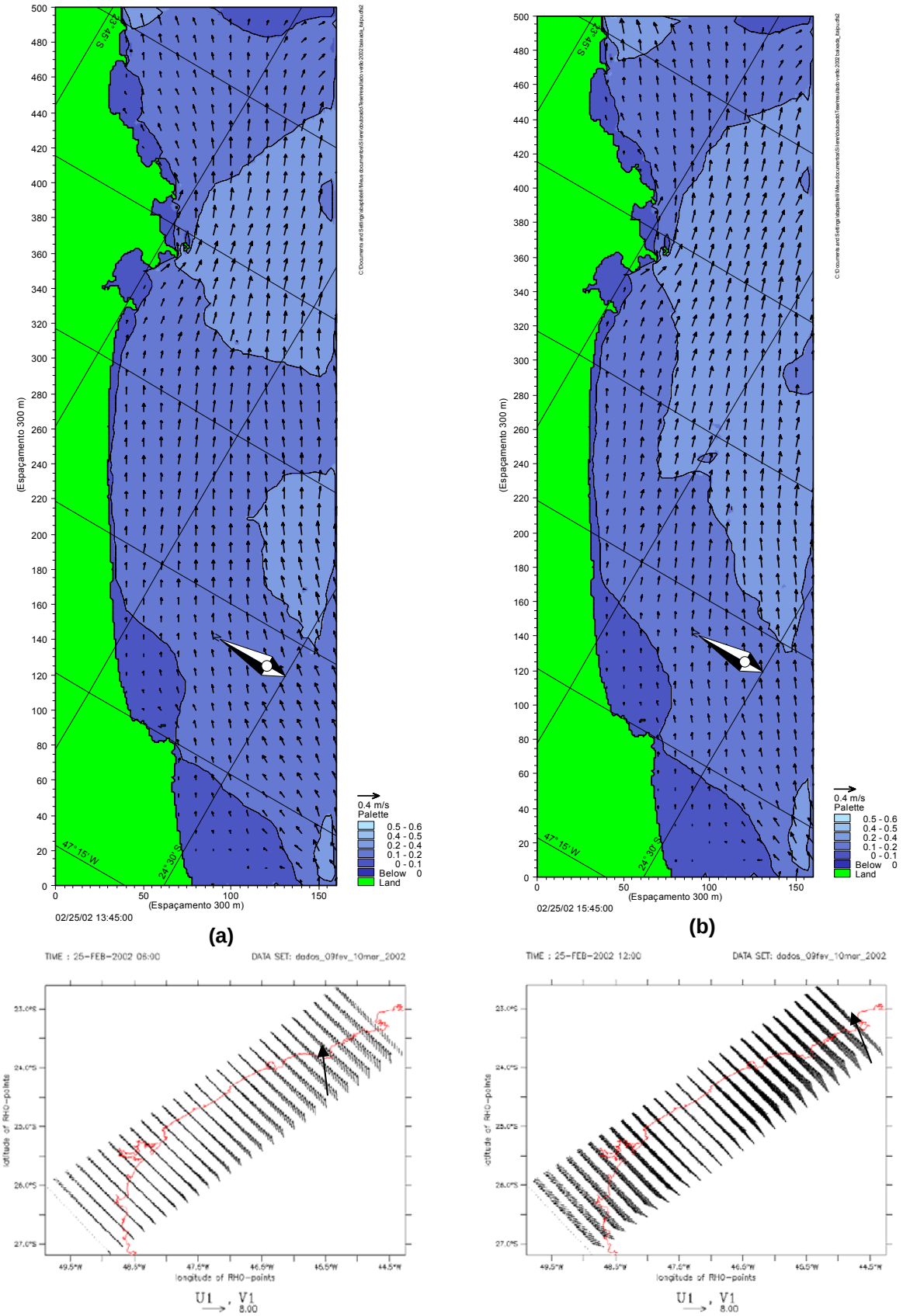


Figura 59 - Resultado da simulação do Verão de 2002 - MIKE 21 – Mapas de correntes – Grade Baixada – (a) 25/02/02 – 13:45 h – Sizígia – Estofa de maré (b) 25/02/2002 – 15:45 – Sizígia – Vazante

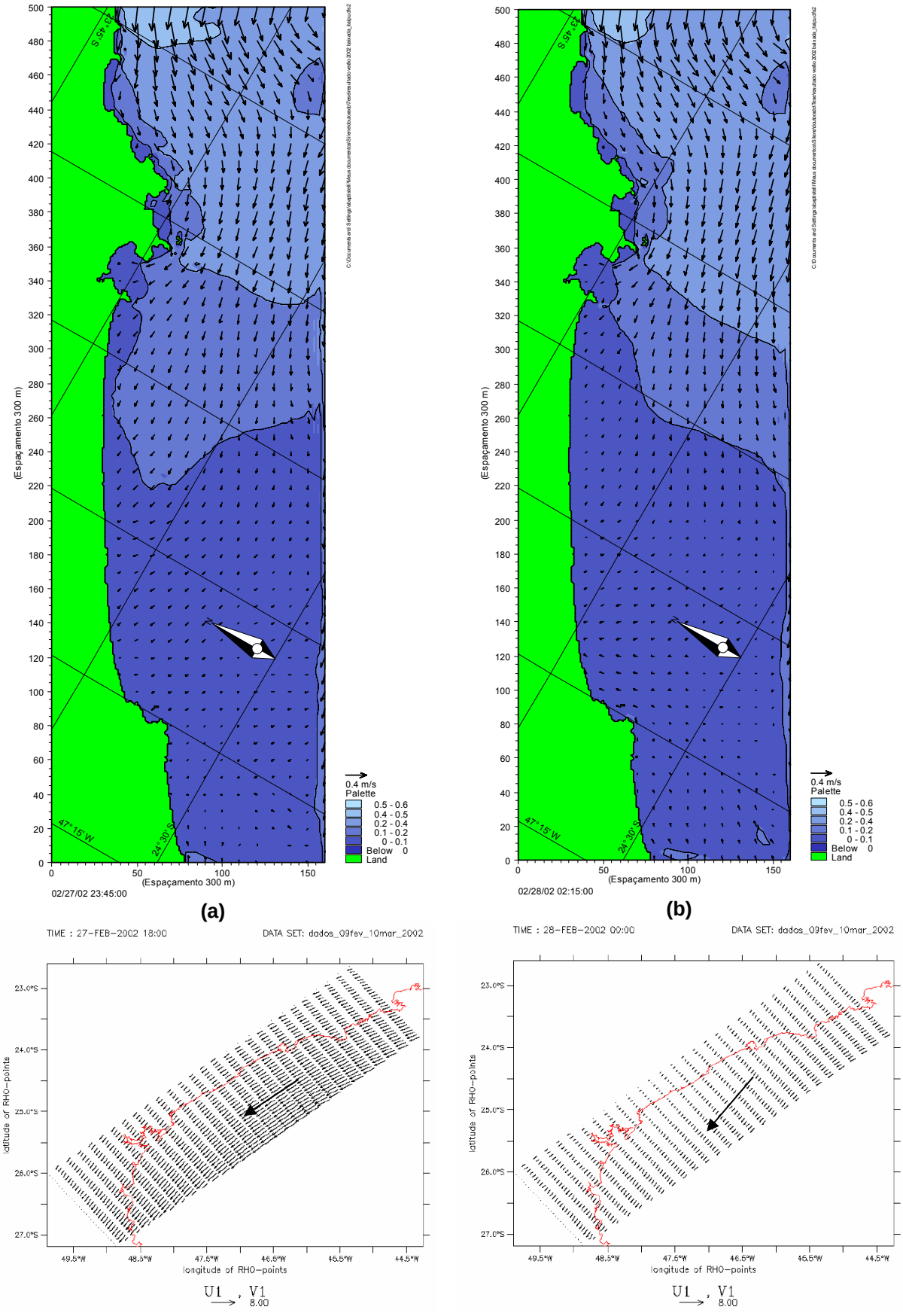


Figura 60 - Resultado da simulação do Verão de 2002 - MIKE 21 – Mapas de correntes – Grade Baixada – (a) 27/02/02 – 23:45 h – Sizígia – Enchente (b) 28/02/2002 – 02:15 – Sizígia – Enchente

Na Figura 61 apresenta-se um gráfico de elevação da superfície onde são mostrados os instantes de maré para os mapas de correntes apresentados.

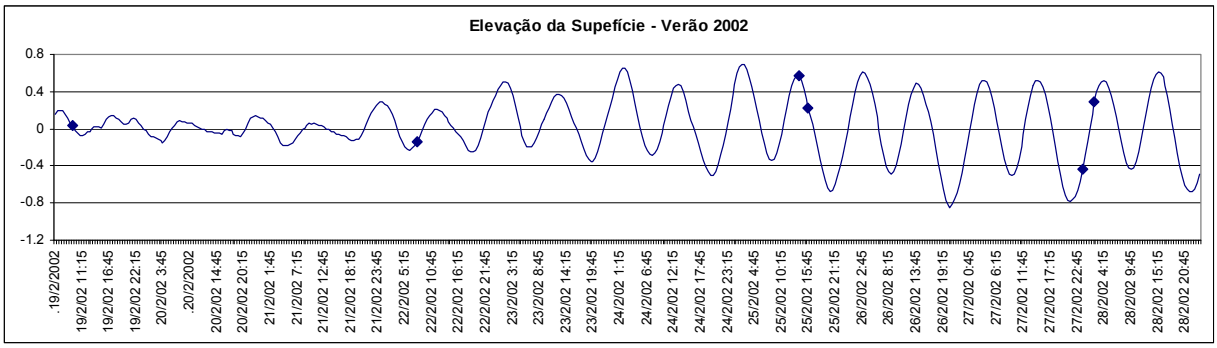


Figura 61 – Gráfico de Elevação da Superfície mostrando os instantes em que foram apresentados os mapas de correntes – Verão 2002

Na Figura 62 apresenta-se as trajetórias traçadas a partir da simulação com o MIKE 21 (grade Baixada) para o período de 16/02/2002 a 3/3/2002. Estas trajetórias foram traçadas a partir dos pontos de lançamento dos emissários submarinos de Santos / São Vicente e Praia Grande 1 – PG1, e de dois outros pontos aleatórios próximos à Ponta de Itaipu (24º0’18”S, 46º25’22”W) e próximo a praia (24º3’47”S, 46º34’20”W).

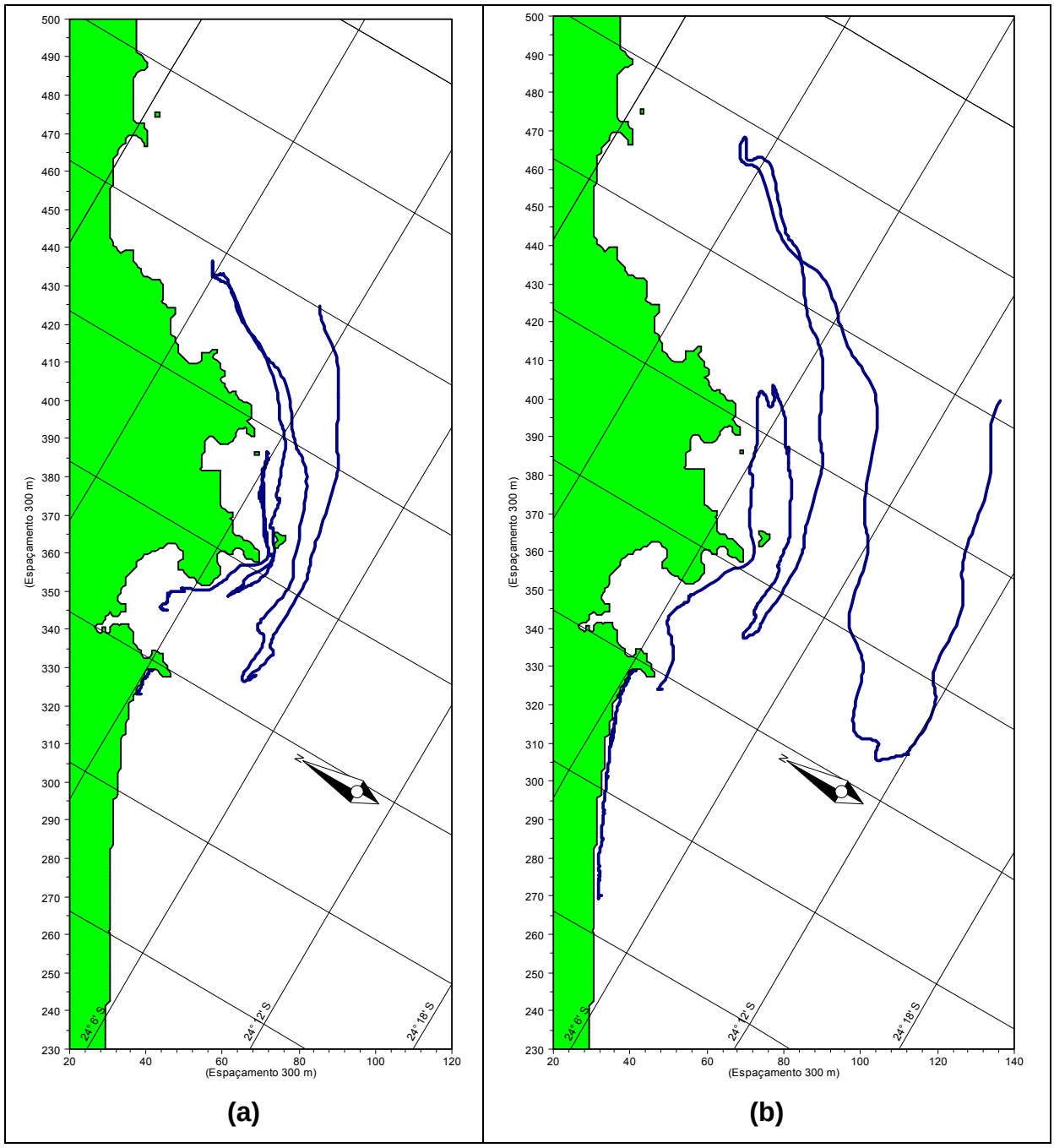


Figura 62 - Trajetórias traçadas a partir (a) do Ponto de Lançamento dos Emissários Submarinos de Santos / São Vicente e do ponto próximo a Ponta de Itaipu; (b) do Ponto de Lançamento do Emissário Submarino de Praia Grande – PG1 e do ponto próximo à praia - Resultados de simulações com MIKE 21 – Grade Baixada - Período de 16/02/2002 a 3/03/2002

8.1.5 Resultados das Simulações do Estuário e Baía de Santos - Correntes

Na seqüência são apresentados os gráficos de comparação das correntes entre os resultados das simulações e as medições de campo, para grade de Santos.

Verão 2002

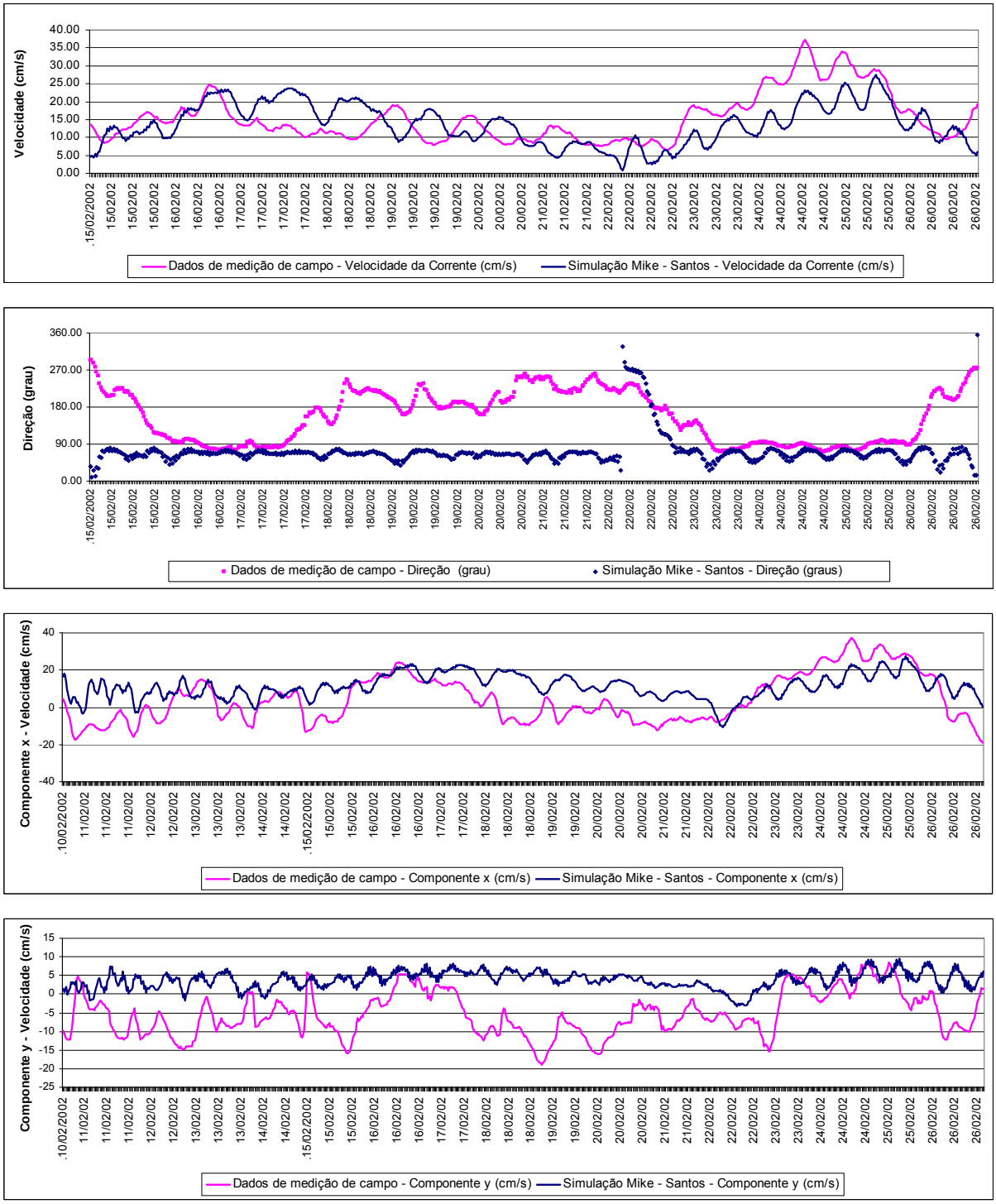


Figura 63 - Comparação entre dados de correntes medidos em campo e resultados da simulação com o MIKE 21 (Grade Santos) – Ponto ADCP-CODESP – Verão 2002 – Velocidades Médias

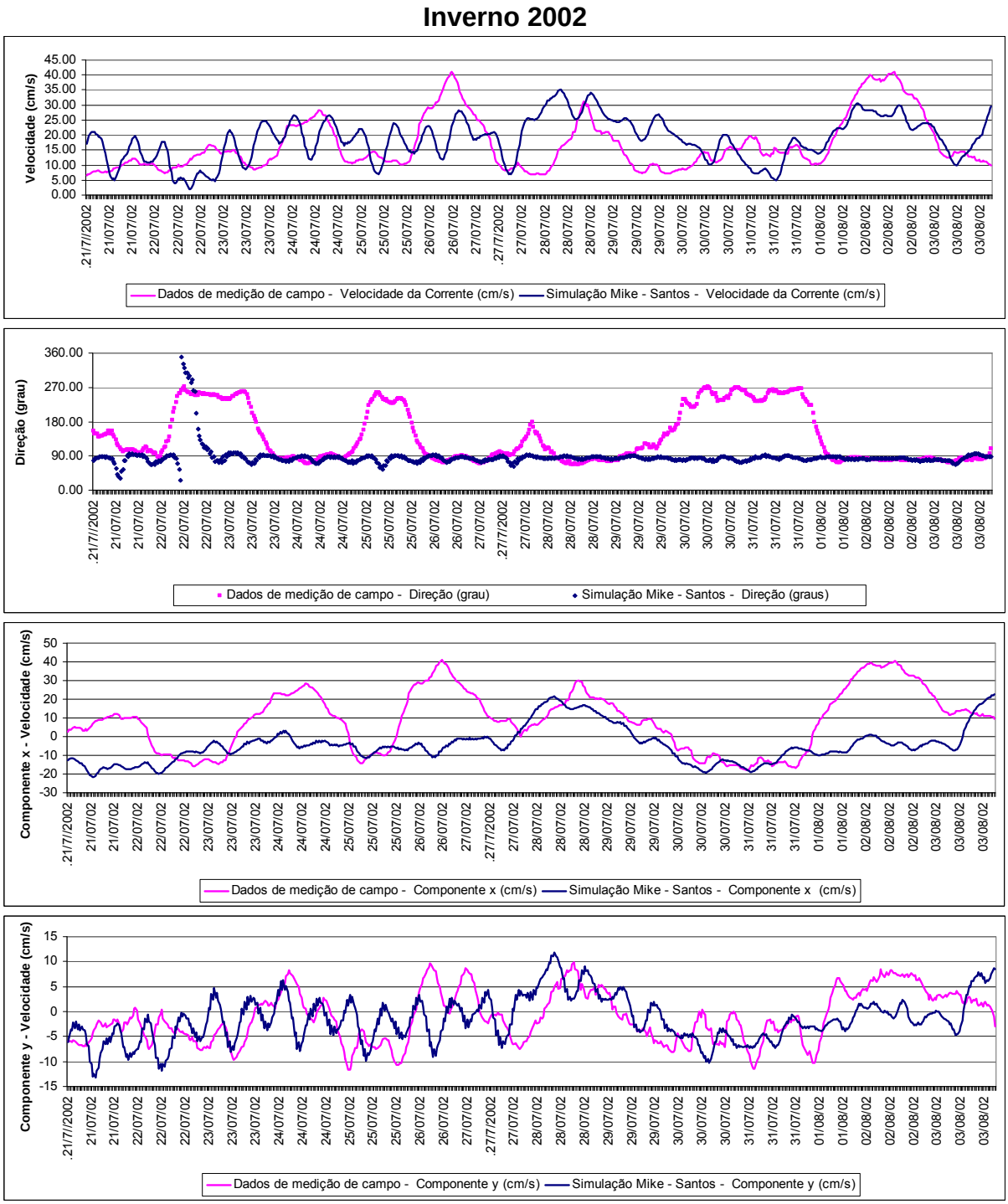


Figura 64 - Comparação entre dados de correntes medidos em campo e resultados da simulação com o MIKE 21 (Grade Santos) – Ponto ADCP-CODESP – Inverno 2002 – Velocidades Médias

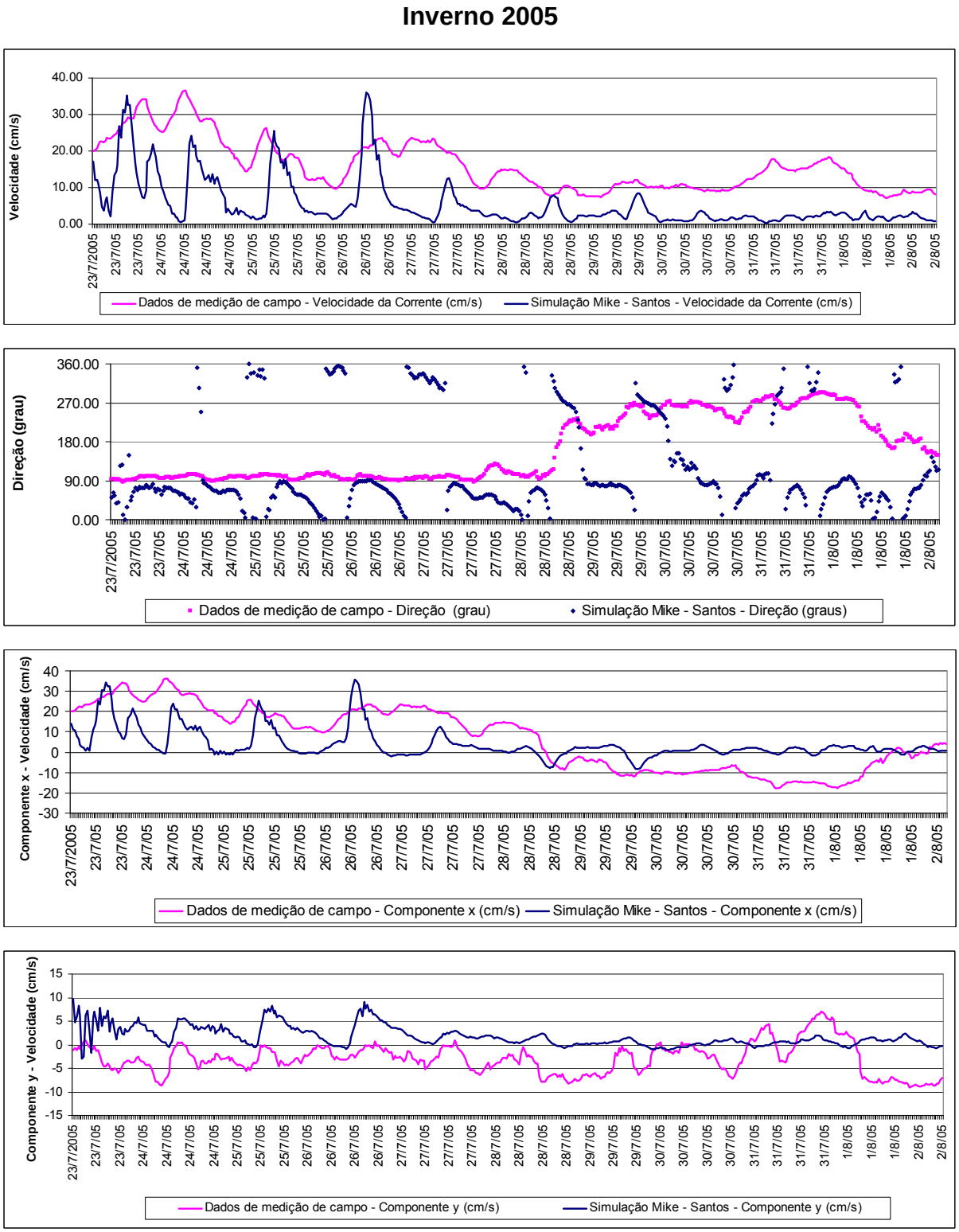


Figura 65 - Comparação entre dados de correntes medidos em campo e resultados da simulação com o MIKE 21 (Grade Santos) – Ponto ADCP-SABESP – Inverno 2005 – Velocidades Médias

Para a visualização das correntes, a seguir são apresentados mapas de correntes para períodos de sizígia e quadratura, em condições de enchente e vazante.

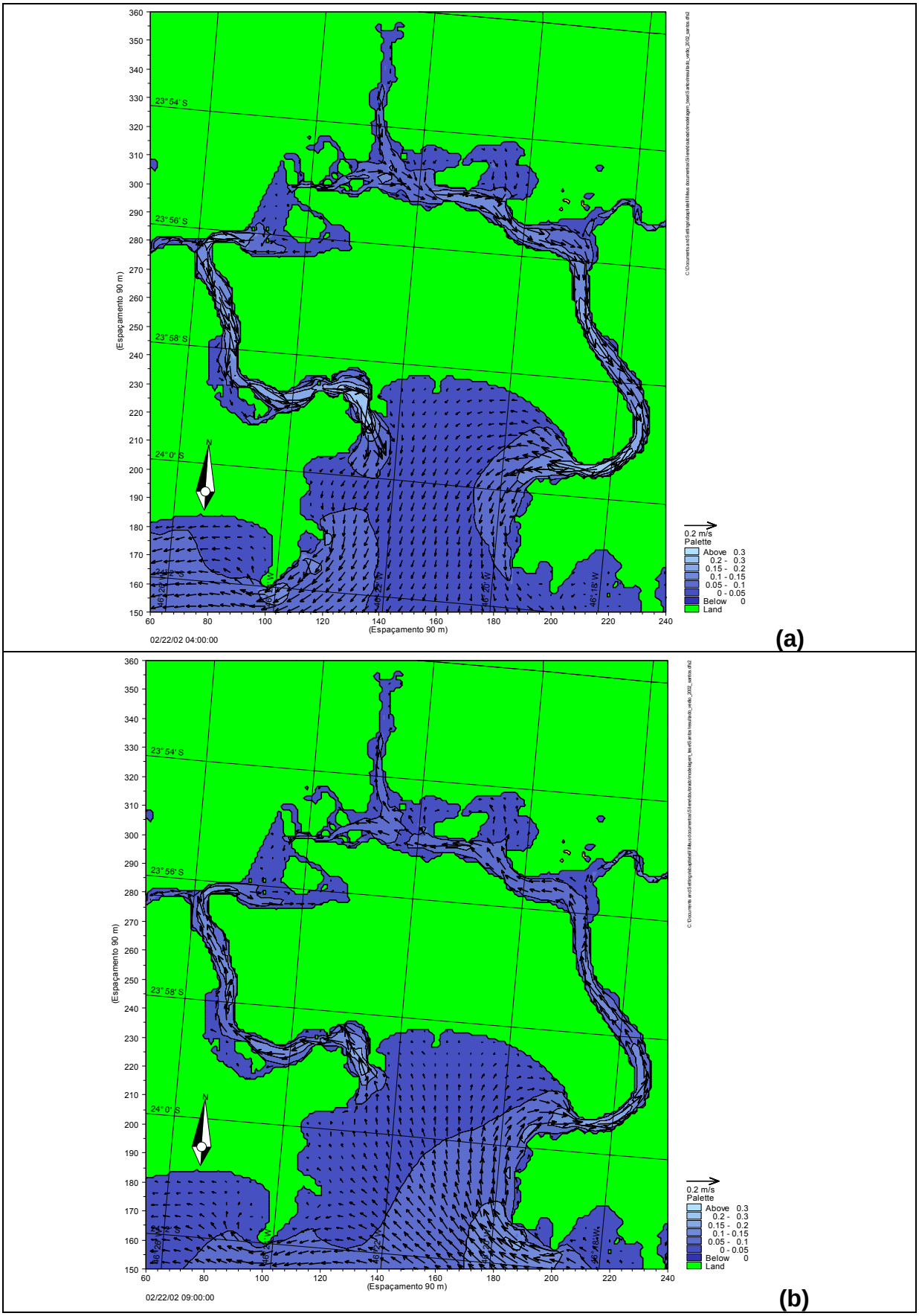


Figura 66 - Resultado da simulação do Verão de 2002 – MIKE 21– Mapas de correntes – Grade Santos - Figura (a): 22/02/2002 – 4:00 h – Vazante – Figura (b): 22/02/2002 – 9:00 h – Enchente - Quadratura

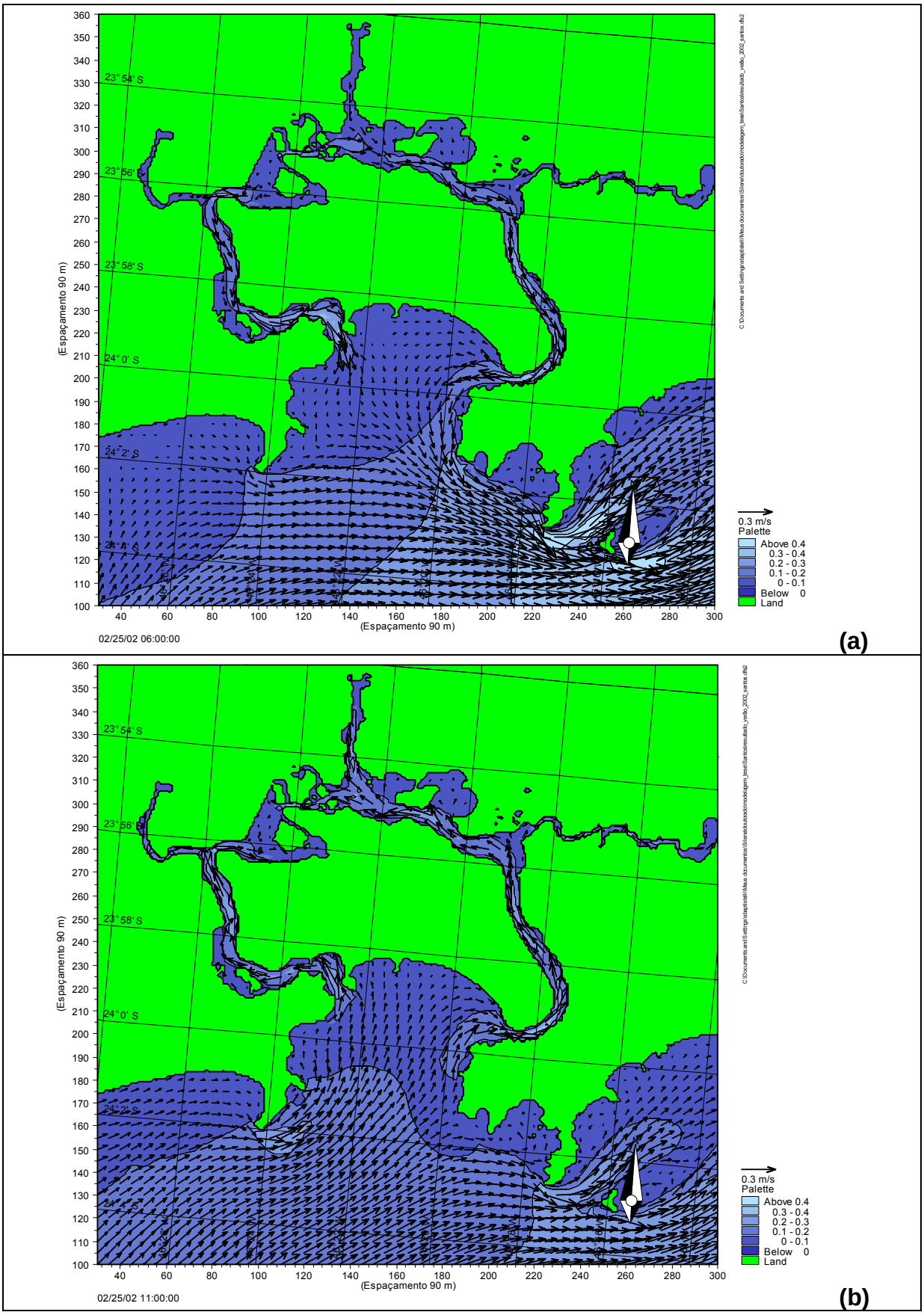


Figura 67 - Resultado da simulação do Verão de 2002 – MIKE 21– Mapas de correntes – Grade Santos - Figura (a): 25/02/2002 – 6:00 h – Vazante – Figura (b): 25/02/2002 – 11:00 h – Enchente - Sizígia

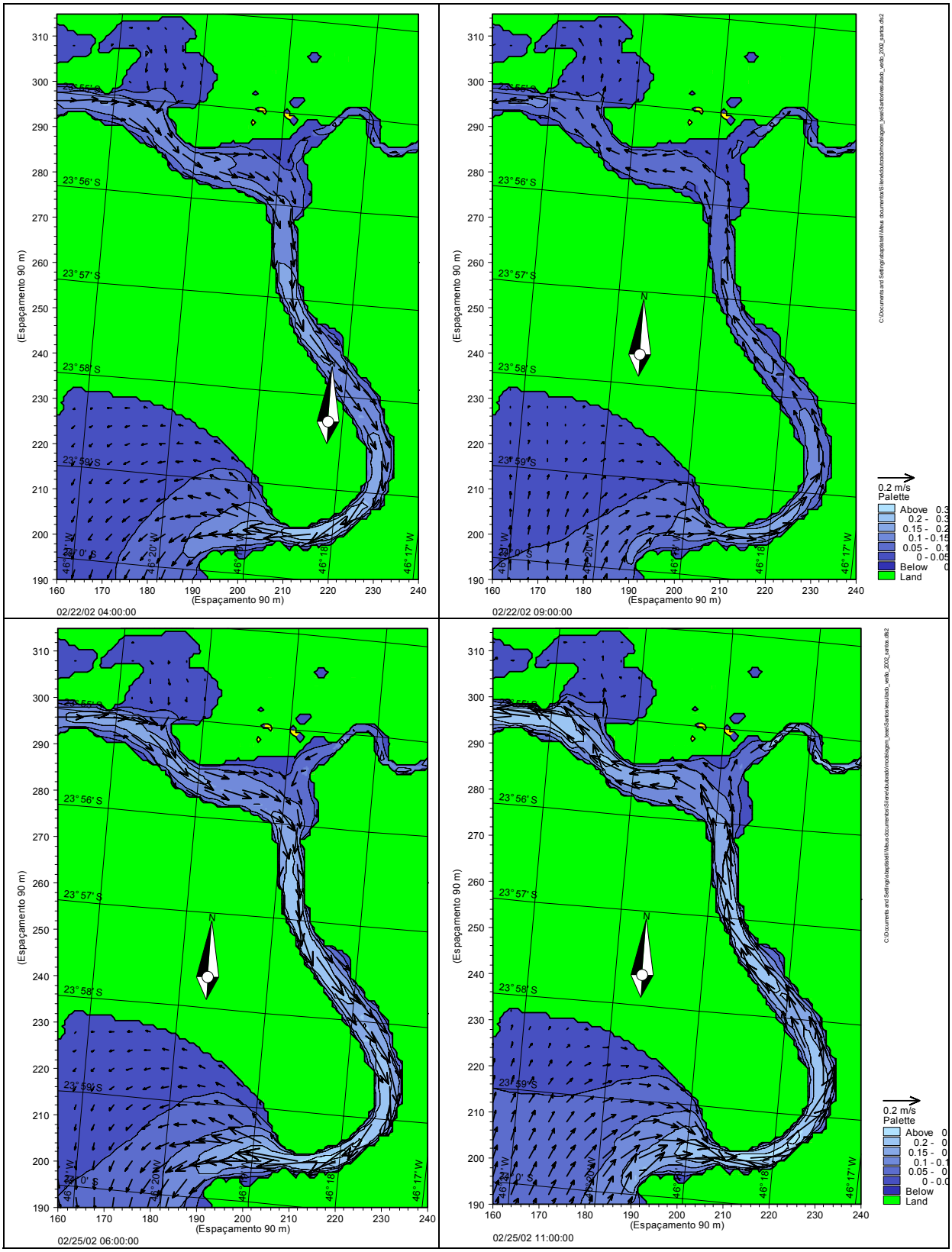


Figura 68 - Resultado da simulação do Verão de 2002 – MIKE 21– Mapas de correntes – Grade Santos – Detalhe Canal do Porto

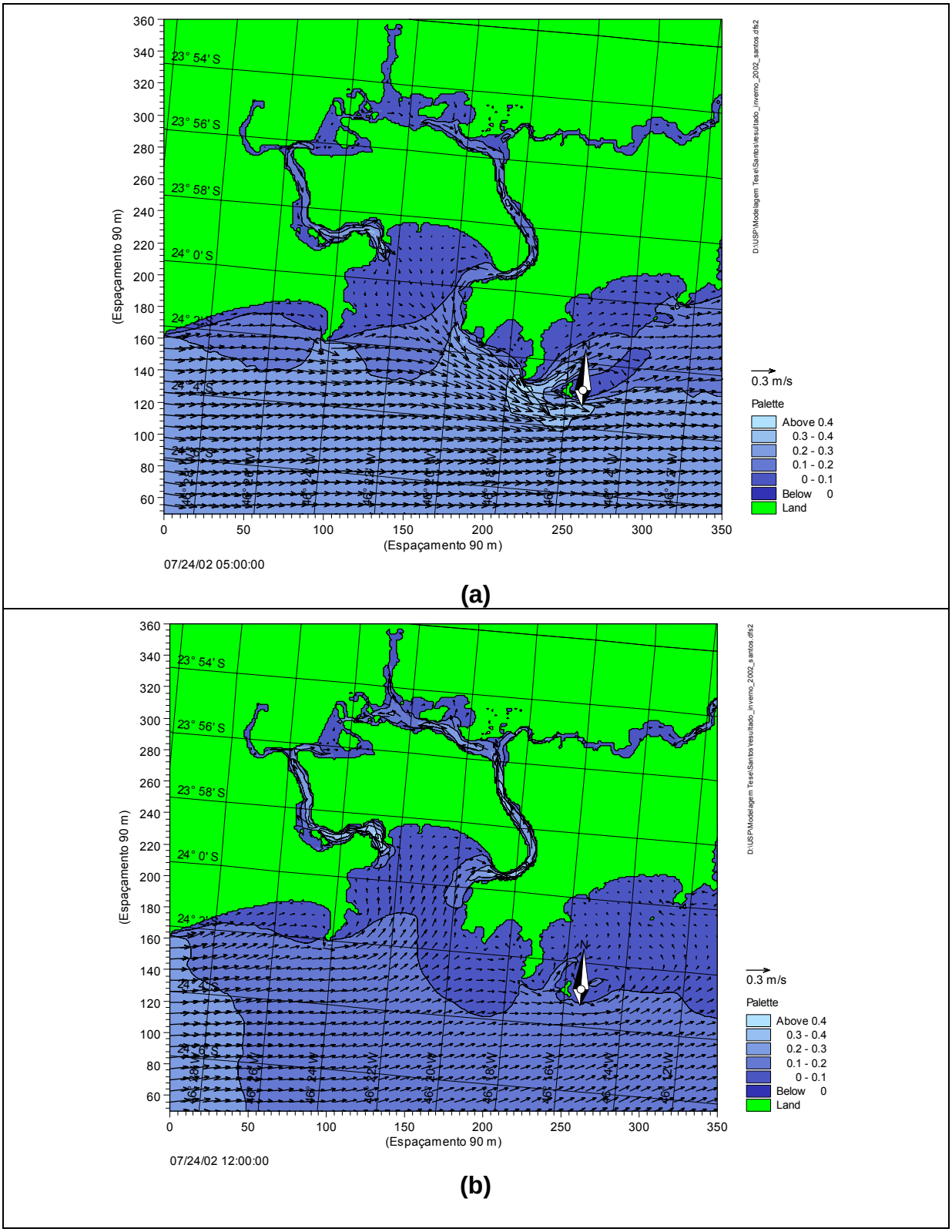


Figura 69 - Resultado da simulação do Inverno de 2002 – MIKE 21– Mapas de correntes – Grade Santos - Figura (a): 24/07/02 – 5:00 h – Vazante – Figura (b): 24/07/02 – 12:00 h – Sizígia - Enchente

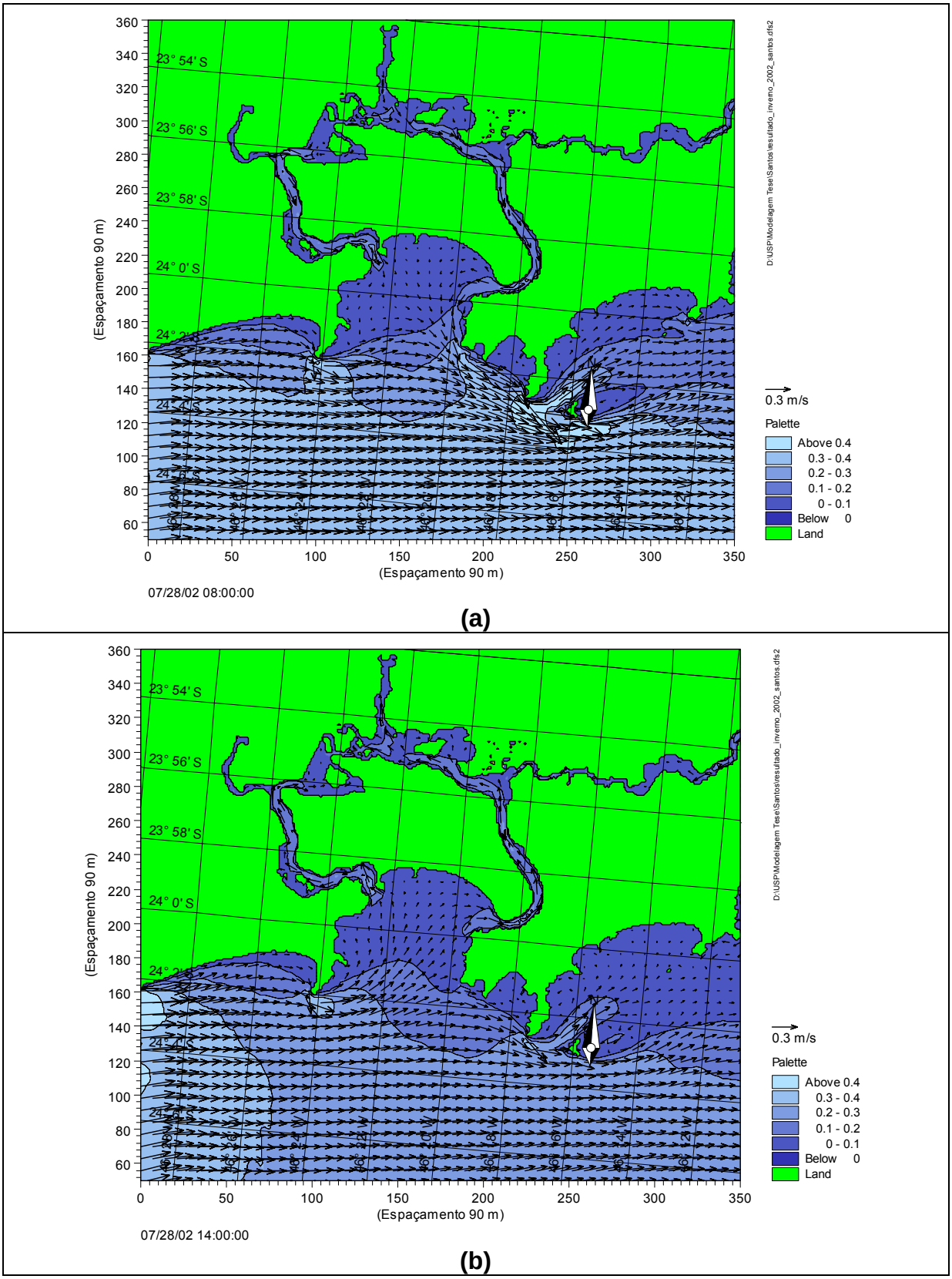


Figura 70 - Resultado da simulação do Inverno de 2002 - MIKE 21– Mapas de correntes – Grade Santos - Figura (a): 28/07/02 – 08:00 h – Vazante – Figura (b): 28/07/02 – 14:00 h – Sizígia – Enchente

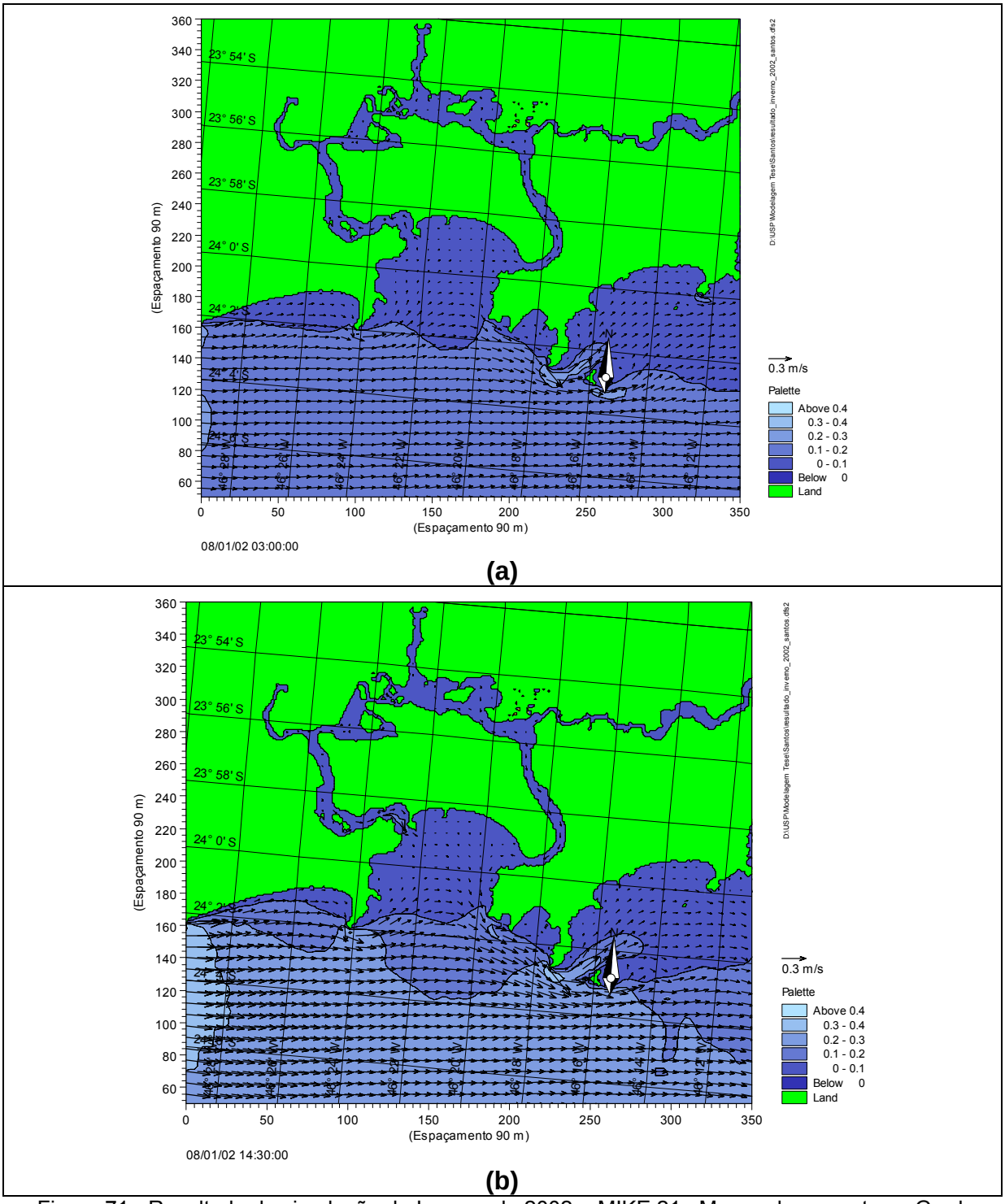


Figura 71 - Resultado da simulação do Inverno de 2002 - MIKE 21– Mapas de correntes – Grade Santos - Figura (a): 01/08/02 – 03:00 h – Enchente – Figura (b): 01/08/02 – 14:30 h – Quadratura – Vazante

O gráfico de elevação da superfície onde são mostrados os instantes de maré para os mapas de correntes apresentados é dado na Figura 72.

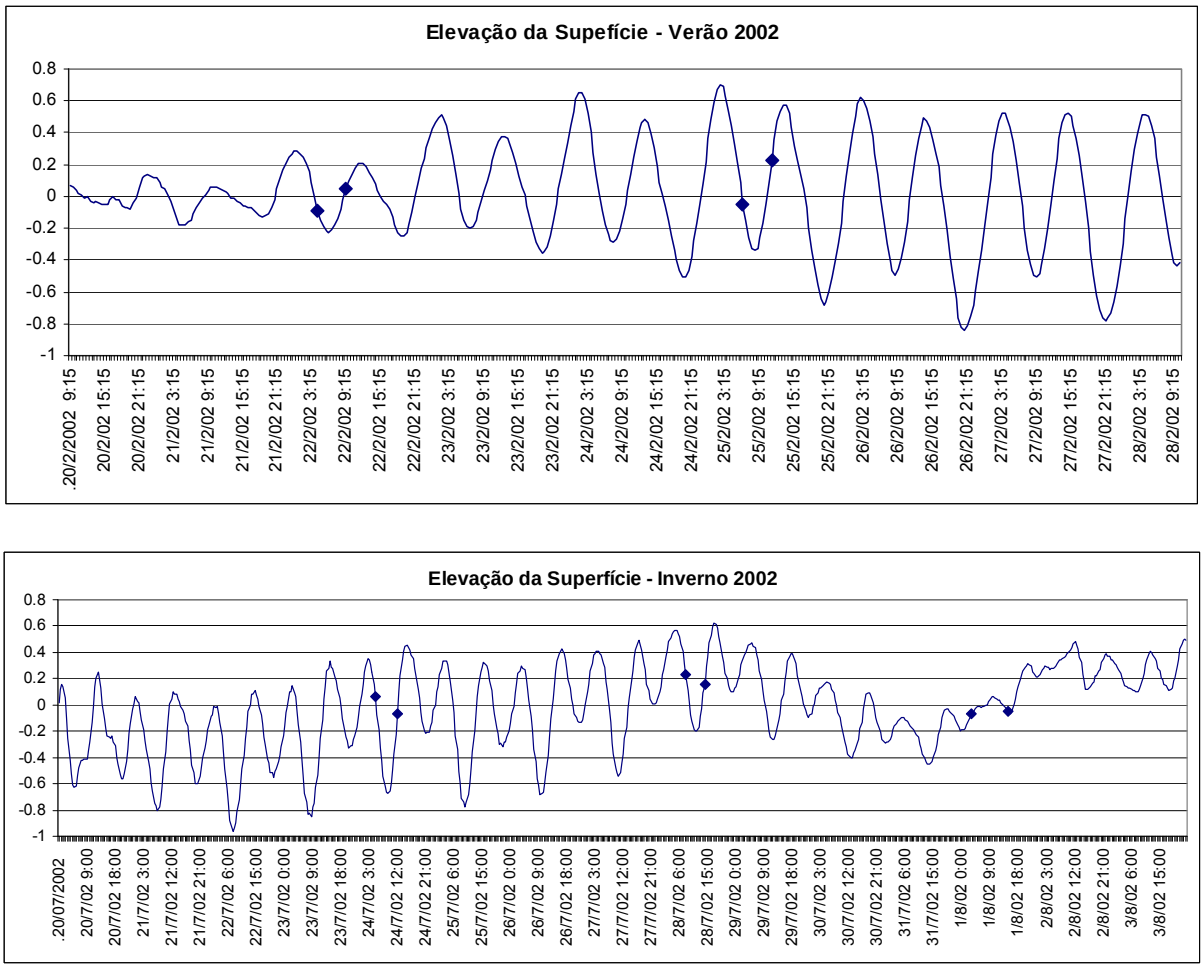


Figura 72 – Gráfico de Elevação da Superfície mostrando os instantes em que foram apresentados os mapas de correntes – Inverno 2002

As trajetórias descritas pela simulação (MIKE 21) para o processamento efetuado nos períodos de 22/02/2002 a 24/02/2002 e de 25/02/2002 a 27/02/2002 são apresentadas nas Figuras 73 e 74. As trajetórias são traçadas a partir dos pontos de lançamento do Emissário Santos / São Vicente e do Emissário PG1 da Praia Grande.

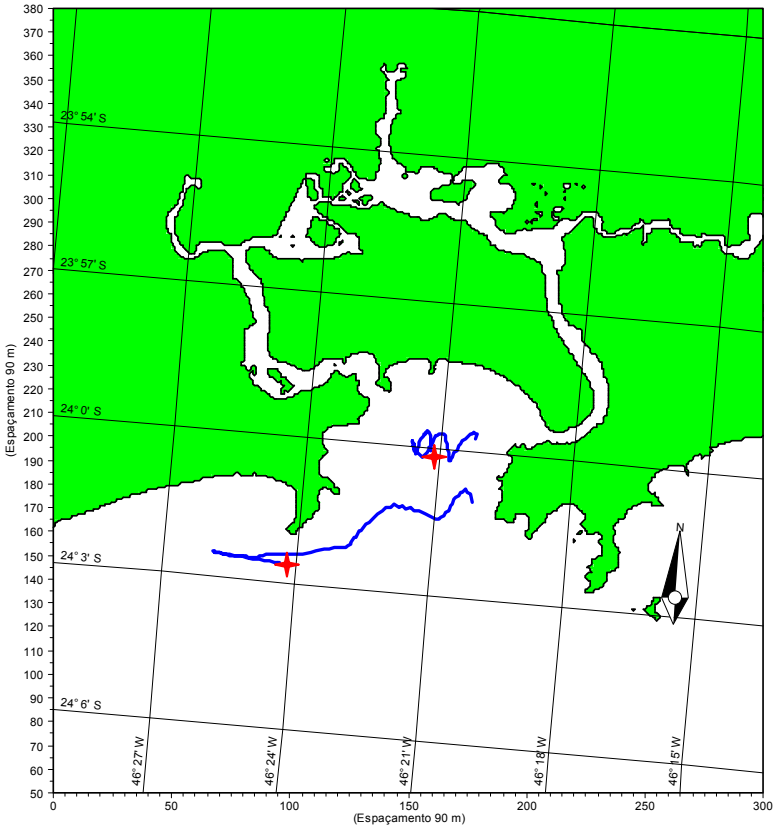


Figura 73 – Trajetórias traçadas a partir dos pontos de lançamento dos emissários submarinos de Santos / São Vicente e Praia Grande com os resultados de simulações com MIKE 21. Período de 22/02/2002 a 24/02/2002

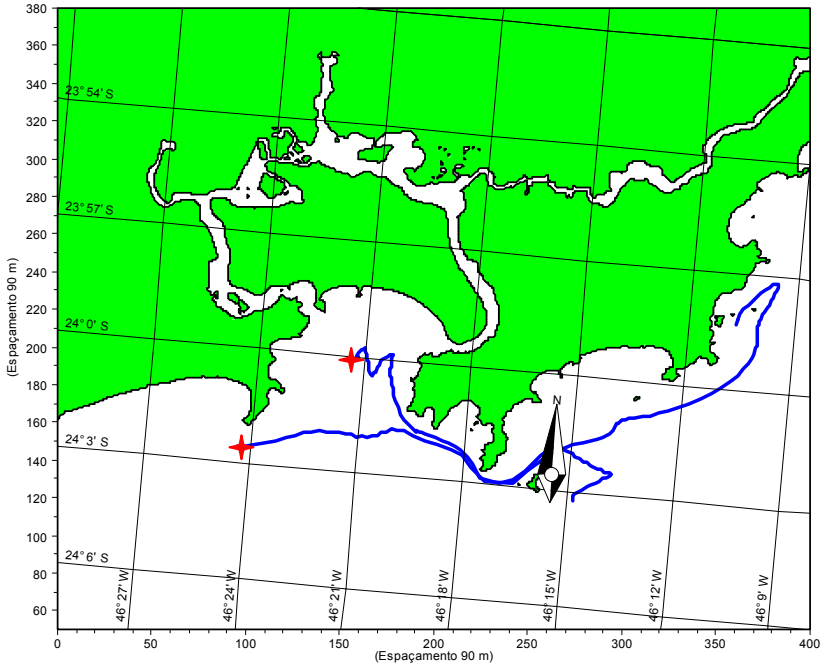


Figura 74 - Trajetórias traçadas a partir dos pontos de lançamento dos emissários submarinos de Santos / São Vicente e Praia Grande com os resultados de simulações com MIKE 21. Período de 25/02/2002 a 27/02/2002

8.1.6 Comparação entre os resultados das três grades

Na figura a seguir é apresentada a comparação entre os resultados de um mesmo período para as três grades usadas nas simulações.

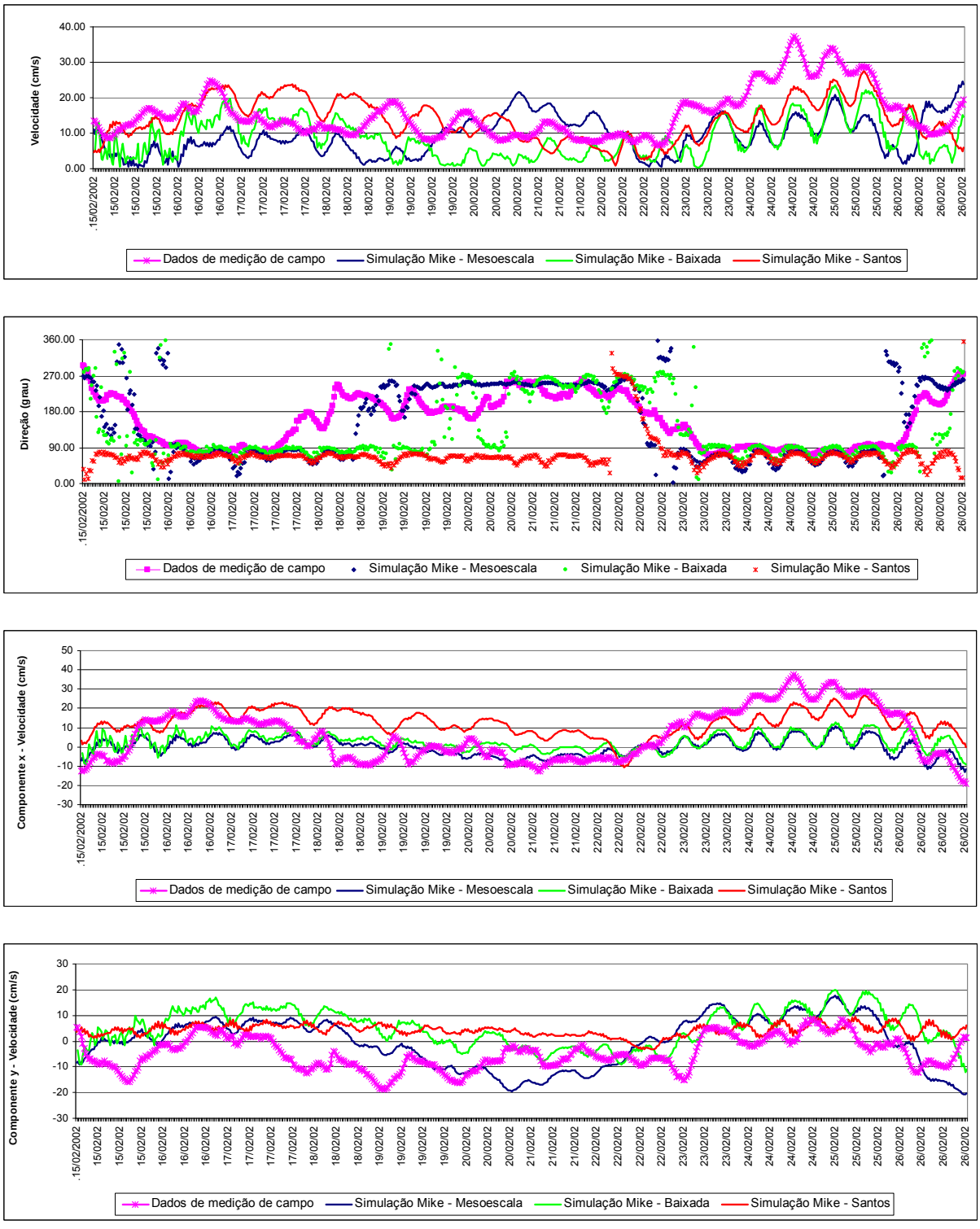


Figura 75 – Comparação entre dados de correntes medidos em campo e resultados da simulação com o MIKE 21 (Três Grades) – Ponto ADCP-CODESP – Verão 2002 – Velocidades Médias

8.1.7 Correlação dos resultados

Na seqüência são apresentados os gráficos de dispersão dos valores de velocidade das correntes para a “Componente x” (Componente E-W do vetor velocidade) das simulações com o MIKE 21 versus os valores de observação de campo. Nestes gráficos são traçadas linhas de tendência de regressão linear com intersecção em zero. São dados a equação da reta e o R-quadrado, que correspondem a um valor de coeficiente de correlação.

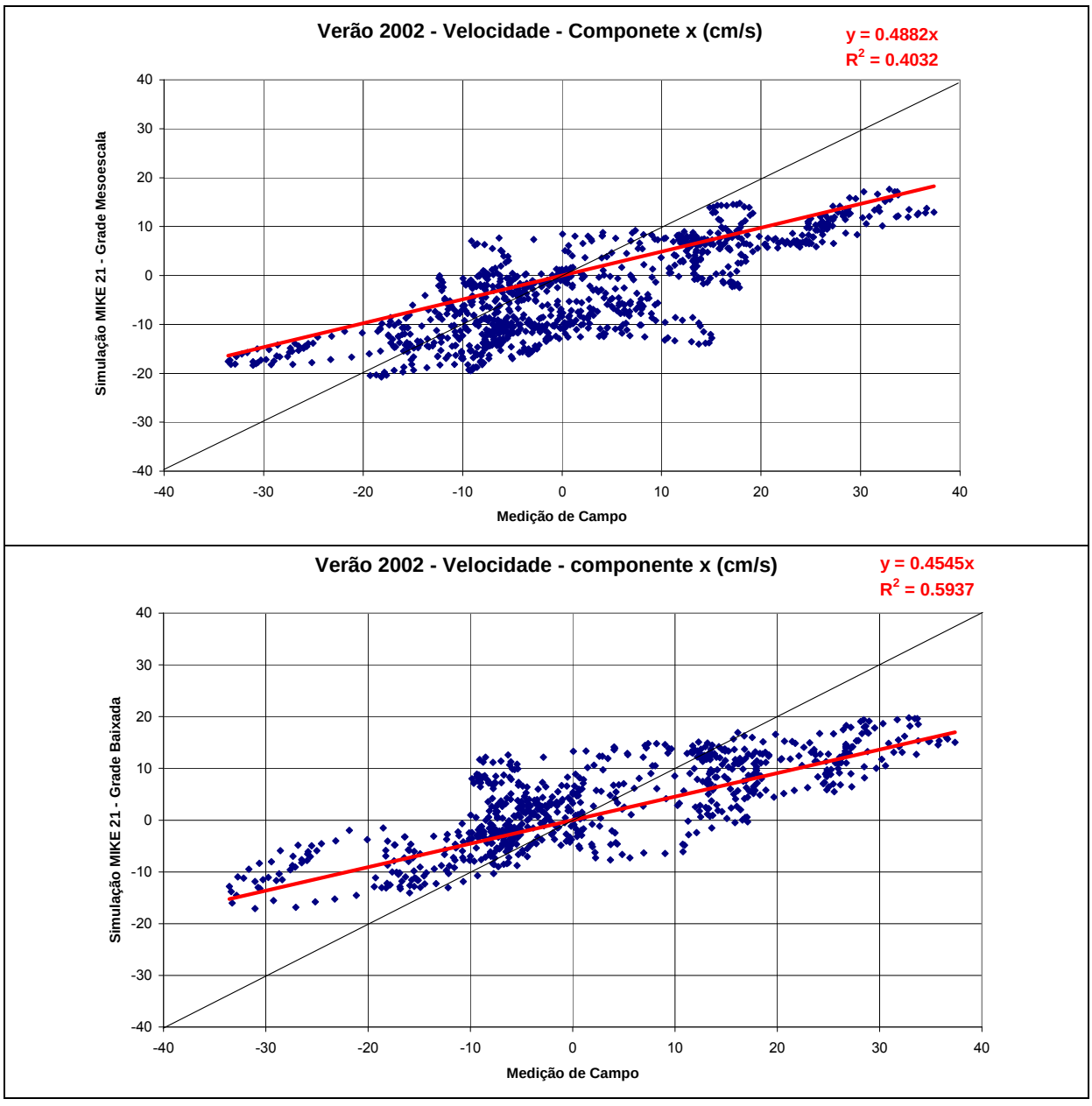


Figura 76 - Gráfico de dispersão entre os valores da ‘Componente x’ da Velocidade de Corrente entre a Simulação MIKE 21 e Observações de Campo – Verão 2002 – Grades Meso-escala e Baixada

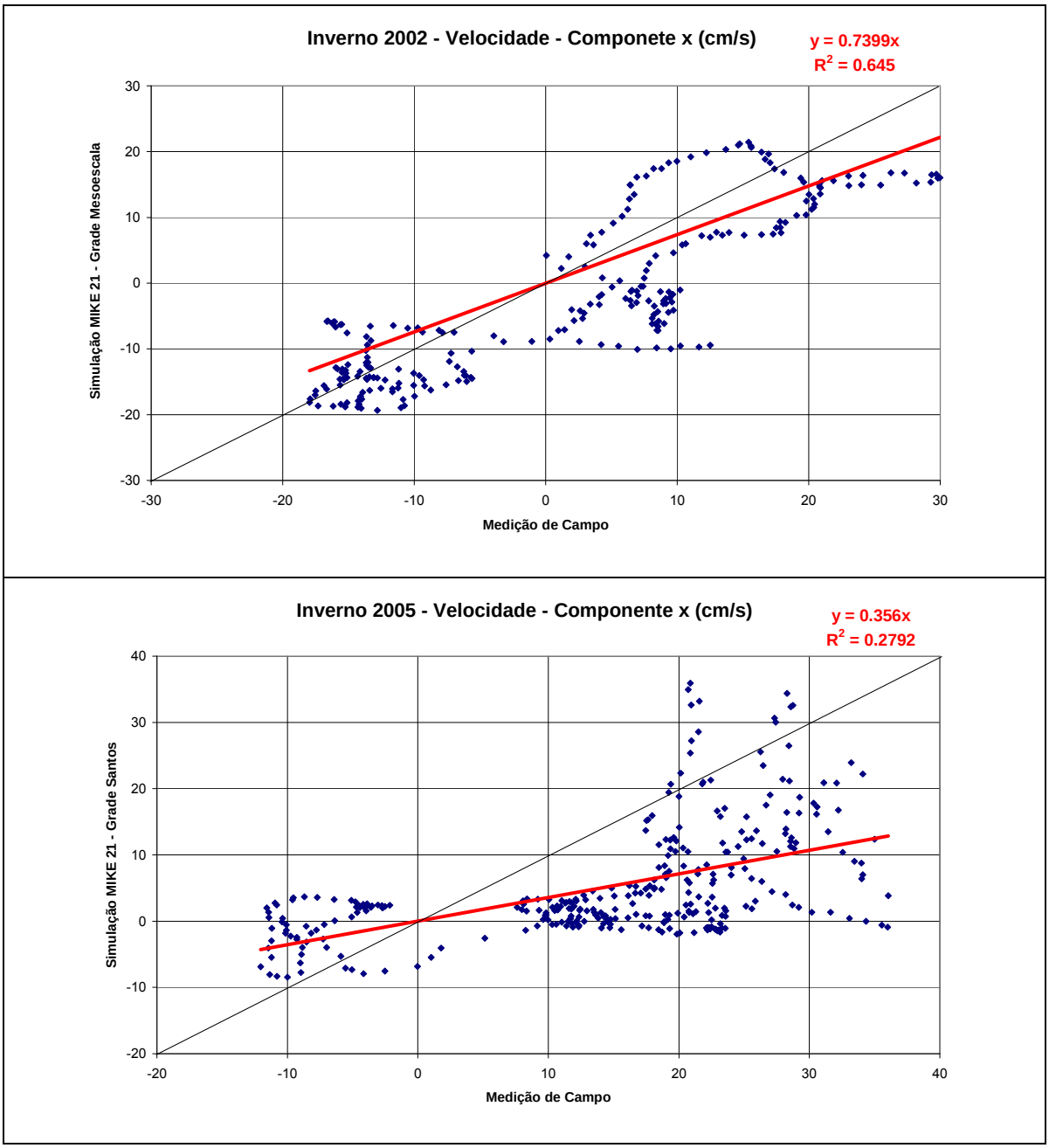


Figura 77 - Gráfico de dispersão entre os valores da 'Componente x' da Velocidade de Corrente entre a Simulação MIKE 21 e Observações de Campo – Inverno 2002 e Inverno 2005 – Grades Baixada e Santos

Os coeficientes de correlação apresentados na Figura 76 são de 0,63 para verão de 2002, grade Meso-escala para o período de 10/02/2002 a 01/03/2002 e de 0,77 para verão de 2002, grade Baixada para o período 15/02/2002 a 01/03/2002.

Na Figura 77, os coeficientes de correlação são de 0,80 para o inverno de 2002, grade Meso-escala para o período de 27/07/2002 a 01/08/2002 e de 0,53 para o inverno de 2005, grade Santos para o período 23/07/2005 a 30/07/2005.

8.1.8 Trajetórias traçadas a partir das Áreas de Fundeadouros do Porto de Santos

Conforme informações CODESP (Porto de Santos, 2008), as áreas de Fundeadouros do Porto de Santos de acordo com a última edição atualizada da Carta Náutica DHN 1701, estão demarcadas pelas seguintes coordenadas geográficas:

- Fundeadouro Interno destinado a navios com calado máximo de 9 metros, somente no período diurno:
  a) 23° 55' 48" S e 46° 19' 00" W b) 23° 55' 40" S e 46° 19' 00" W
  c) 23° 55' 39" S e 46° 19' 24" W d) 23° 55' 34" S e 46° 19' 24" W

- Fundeadouro destinado a navios de guerra:
  a) 24° 59' 24" S e 46° 20' 12" W b) 23° 59' 24" S e 46° 20' 48" W
  c) 24° 00' 00" S e 46° 20' 48" W d) 24° 00' 00" S e 46° 20' 24" W

- Fundeadouro destinado a navios que necessitem efetuar inspeção sanitária ou desembaraço (desembarque e embarque de tripulantes, oficinas e materiais), com tempo de permanência não superior a 3 horas:
  a) 24° 00' 45" S e 46° 20' 10" W b) 24° 00' 45" S e 46° 19' 42" W
  c) 24° 01' 30" S e 46° 20' 30" W d) 24° 01' 30" S e 46° 19' 42" W

- Fundeadouro de emergência para embarcações com suspeita de avaria no embalado e/ou vazamento de material radioativo e para navios de quarentena:
  a) 24° 05' 00" S e 46° 24' 27" W b) 24° 05' 00" S e 46° 22' 45" W
  c) 24° 07' 12" S e 46° 25' 27" W d) 24° 07' 12" S e 46° 23' 42" W

- Fundeadouro para navios com programação definida de atracação para as próximas 24 horas:
  a) 24° 03’ 00” S e 46° 20’ 48” W b) 24° 06’ 00” S e 46° 22’ 09” W
  c) 24° 06’ 00” S e 46° 18’ 36” W d) 24° 05’ 18” S e 46° 18’ 36” W

- Fundeadouro para navios com programação de atracação para o Porto de Santos, porém sem definição de dia e hora:
  a) 24° 06’ 00” S e 46° 22’ 06” W b) 24° 06’ 00” S e 46° 18’ 36” W
  c) 24° 05’ 18” S e 46° 18’ 36” W d) 24° 05’ 18” S e 46° 15’ 00” W
  e) 24° 10’ 00” S e 46° 15’ 00” W f) 24° 10’ 00” S e 46° 19’ 24” W

- Fundeadouro para navios sem programação de atracação para o Porto de Santos:
  a) 24° 10’ 00” S e 46° 19’ 24” W b) 24° 10’ 00” S e 46° 15’ 00” W
  c) 24° 05’ 18” S e 46° 15’ 00” W d) 24° 05’ 18” S e 46° 10’ 00” W
  e) 24° 15’ 00” S e 46° 10’ 00” W f) 24° 15’ 00” S e 46° 19’ 24” W

Na Figura 79 apresenta-se as trajetórias traçadas a partir da simulação com o MIKE 21 (grade Meso-escala) para o período de 16/02/2002 a 3/3/2002. Estas trajetórias foram traçadas a partir de áreas demarcadas para fundear as embarcações que atracam no Porto de Santos. Na Figura 80 as trajetórias são traçadas para o período de 27/07/2002 a 6/08/2002. Na Figura 81 as trajetórias são traçadas para três diferentes períodos, nas simulações com a grade de Santos.

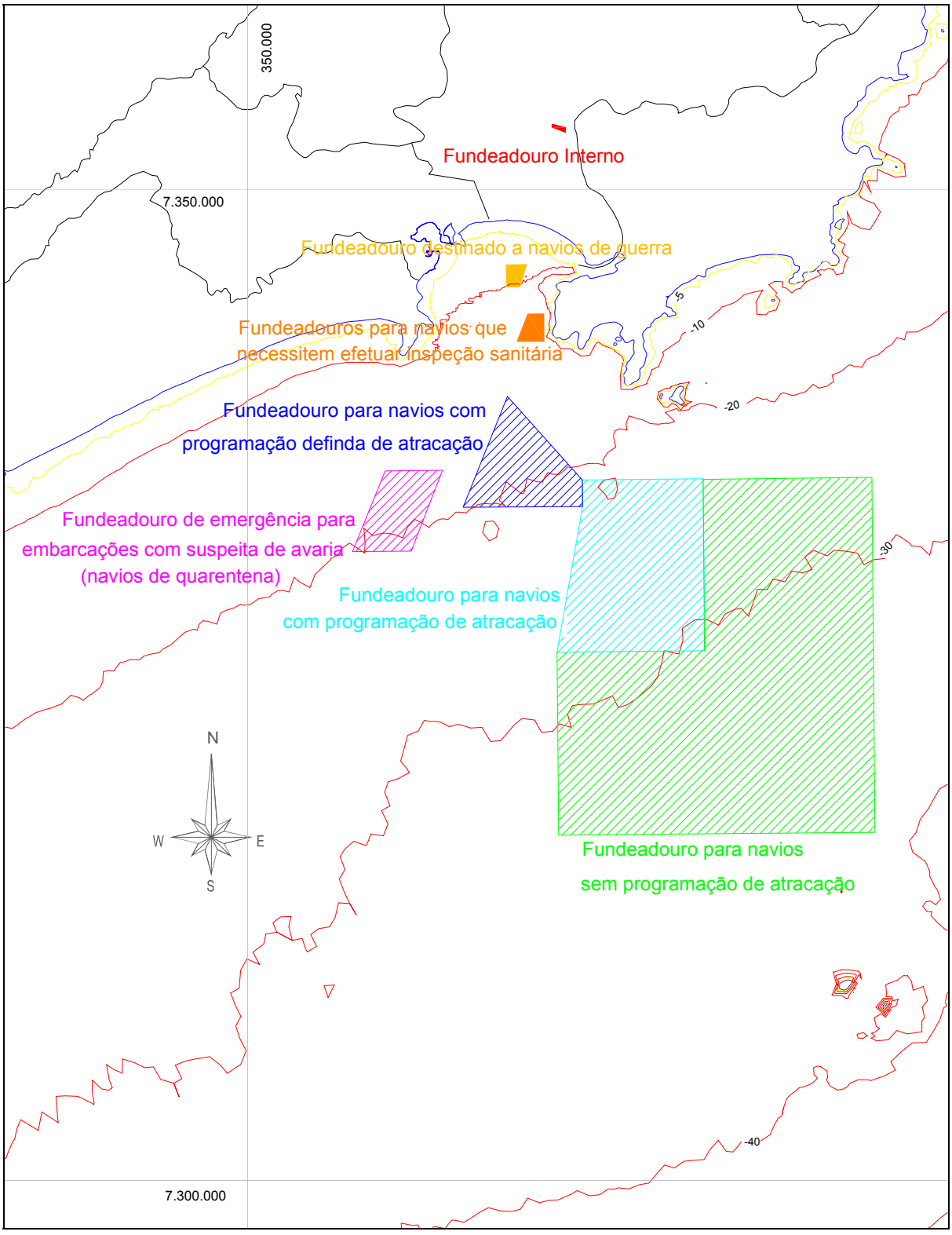


Figura 78 – Localização de Fundeadouros para navios que atracam no Porto de Santos

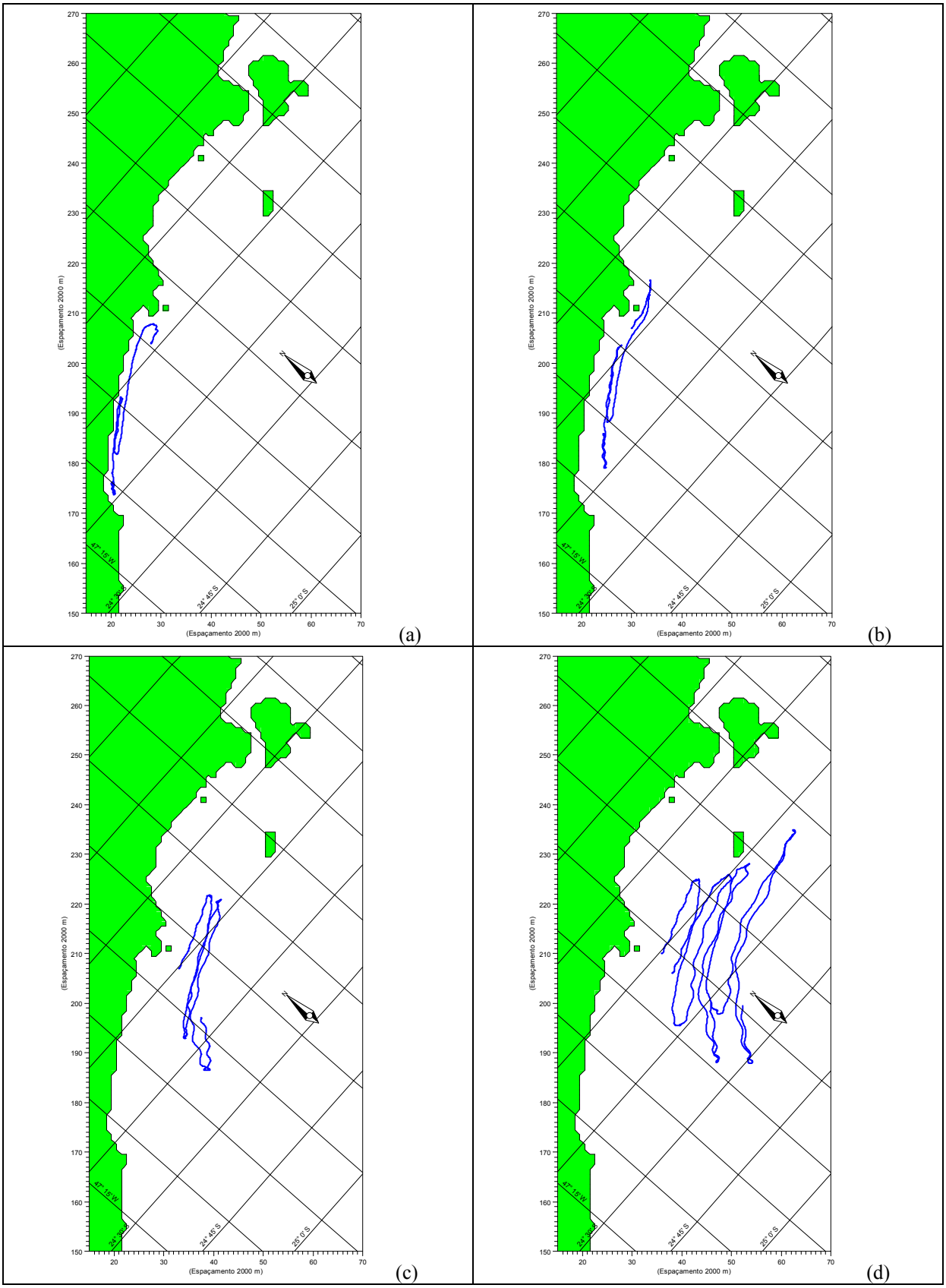


Figura 79 - Trajetórias traçadas a partir de Pontos de Fundeadouros para embarcações com os resultados de simulações com MIKE 21: (a) Centro da área para fundeadouros de emergência (b) Centro da área de fundeadouros para navios com programação definida de atracação (c) Centro da área de fundeadouros com programação (dia e hora não definidas) (d) Centro da área de fundeadouros sem programação – Período de 16/02/2002 a 3/03/2002

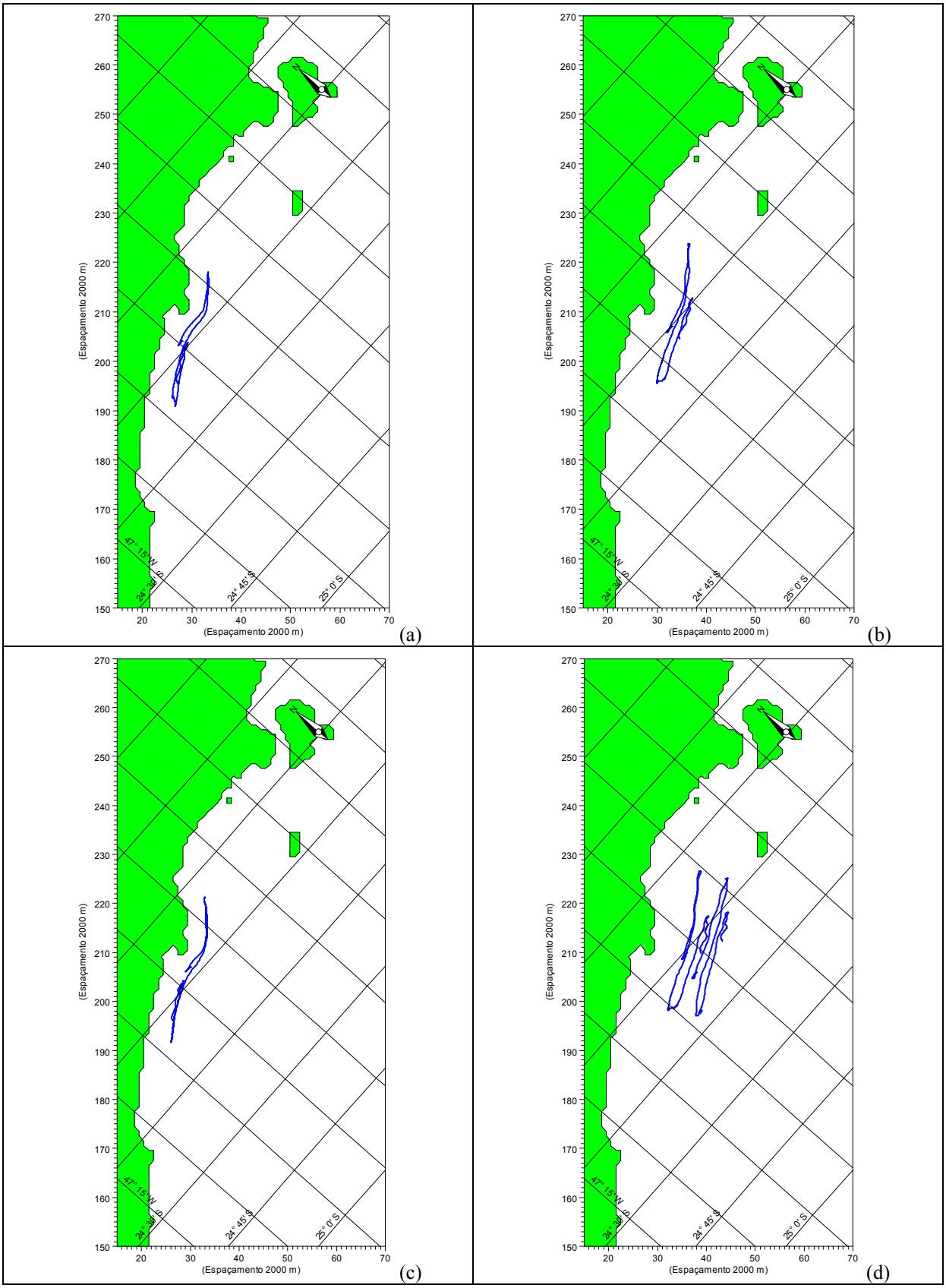


Figura 80 - Trajetórias traçadas a partir de Pontos de Fundeadouros para embarcações com os resultados de simulações com MIKE 21: (a) Centro da área para fundeadouros de emergência (b) Centro da área de fundeadouros para navios com programação definida de atracação (c) Centro da área de fundeadouros com programação (dia e hora não definidas) (d) Centro da área de fundeadouros sem programação – Período de 27/07/2002 a 6/08/2002

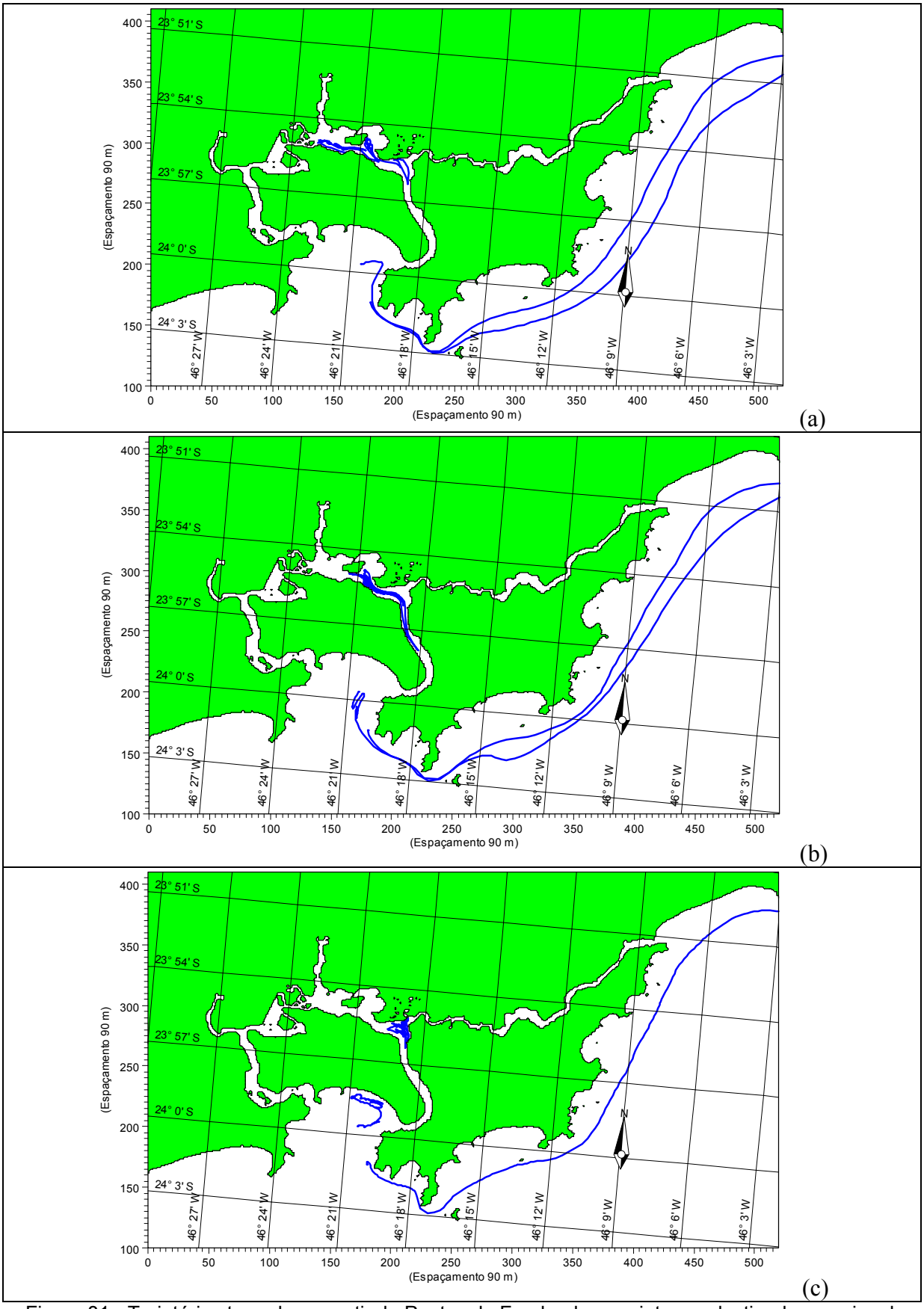


Figura 81 - Trajetórias traçadas a partir de Pontos de Fundeadouros: interno; destinado a navios de guerra e destinados a navios para inspeção sanitária - Simulações MIKE 21: (a) Período de 23/07 a 02/08/2005, início em Enchente de Sizígia (b) Período de 24/07 a 29/07/2005, início em Vazante de Sizígia (c) Período de 28/07a 02/08/2005, início em Enchente de Quadratura

8.1.9 Correntes no Ponto de Lançamento do Emissário Submarino de Santos / São Vicente – MIKE 21

As séries temporais, extraídas dos resultados de simulações com o MIKE 21 para as correntes no ponto de lançamento do emissário submarino de Santos / São Vicente, são apresentadas nas figuras a seguir:

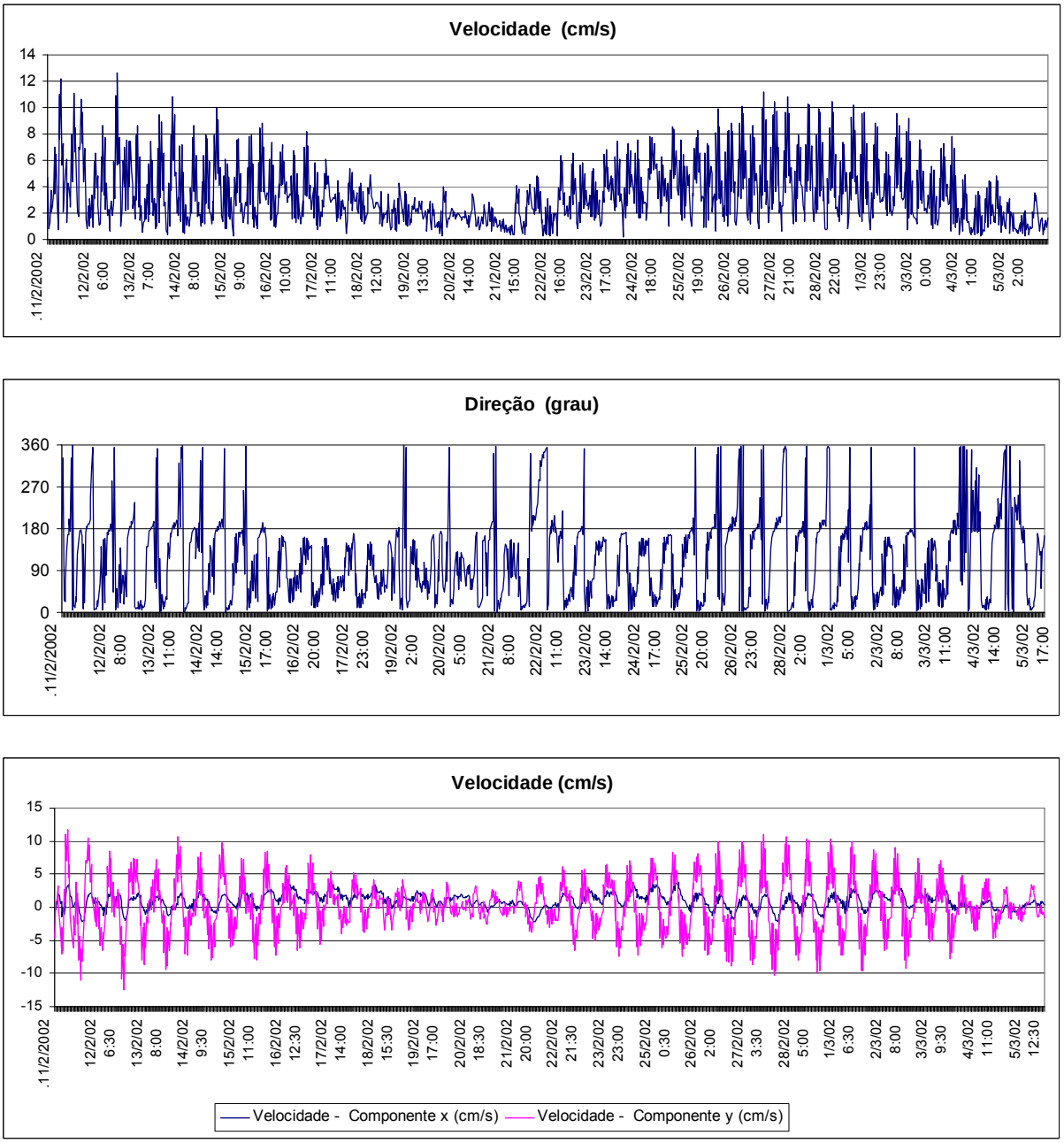


Figura 82 – Velocidades e direção das correntes no ponto de lançamento do emissário submarino de Santos / São Vicente – Verão 2002 – Simulação MIKE 21

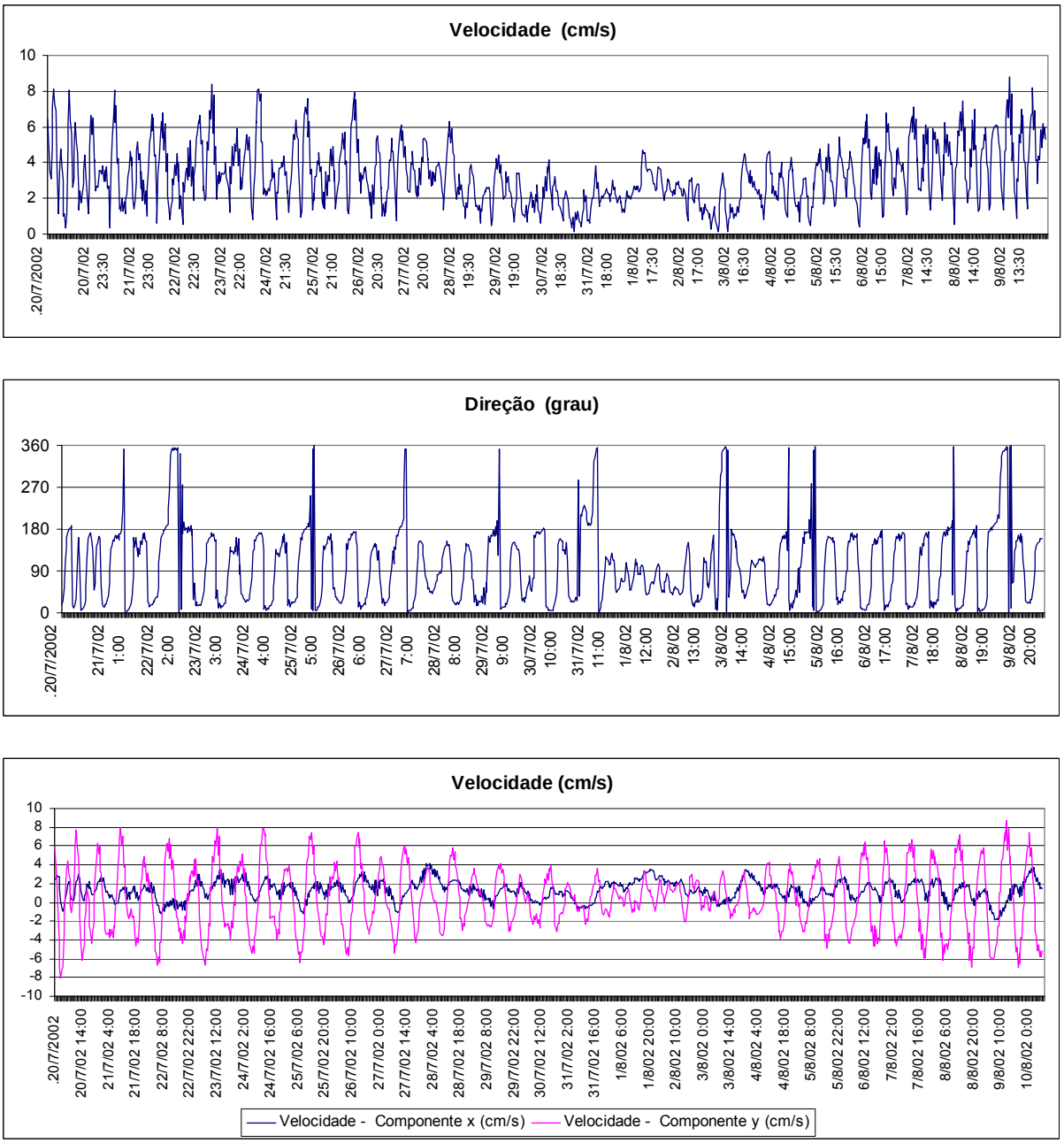


Figura 83 – Velocidades e direção das correntes no ponto de lançamento do emissário submarino de Santos / São Vicente – Inverno 2002 – Simulação MIKE 21

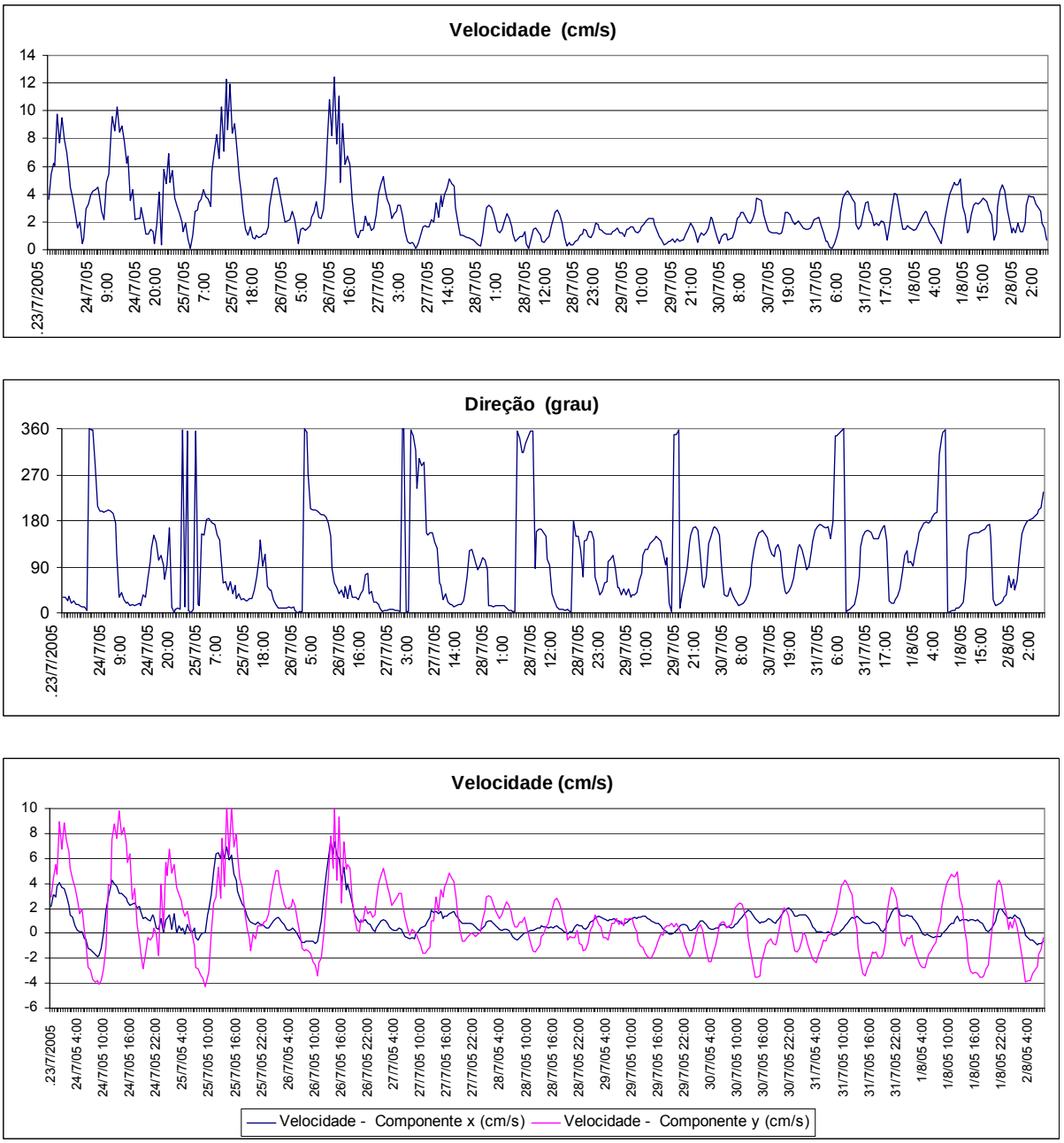


Figura 84 – Velocidades e direção das correntes no ponto de lançamento do emissário submarino de Santos / São Vicente – Inverno 2005 – Simulação MIKE 21

8.2 Simulações com o POM

8.2.1 Elevação da Superfície

Na Figura 85 são apresentados os gráficos de comparação entre os resultados extraídos da simulação com o POM e os dados de medição de campo para a elevação da superfície, para os três períodos simulados. O ponto de medição está localizado na Ilha das Palmas (ver Figura 19 e **Tabela 6**).

Figura 85 - Comparação de valores de elevação da superfície entre a Simulação POM e Observações de Campo

Na Figura 86 são apresentados os gráficos de dispersão dos valores de elevação da superfície das simulações com o POM versus os valores de observação de campo. Nestes gráficos são traçadas as linhas de tendência de regressão linear com intersecção em zero. Para cada período são dados as equações da reta e o R-quadrado, os quais correspondem a um valor de coeficiente de correlação, quais sejam: 0,85 para verão; 0,93 para inverno de 2002 e 0,73 para o inverno de 2005.

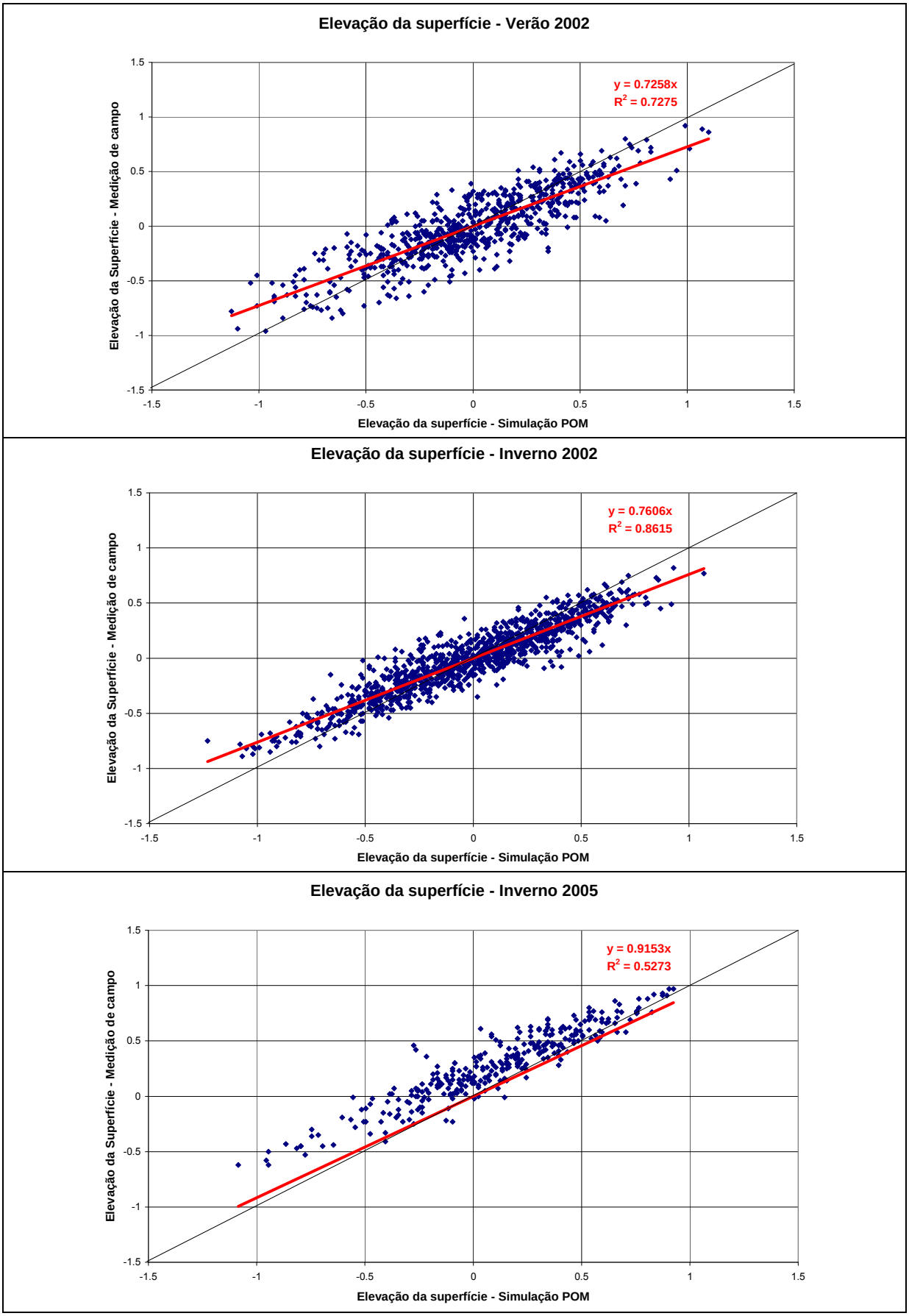


Figura 86 - Gráficos de dispersão entre os valores de elevação da superfície entre a Simulação POM e Observações de Campo

8.2.2 Resultados das Simulações - Correntes

Na seqüência são apresentados os gráficos de comparação entre os resultados das simulações e as medições de campo, com relação às correntes. Os gráficos são divididos em velocidade, direção, componente x (componente “u” do vetor velocidade - E-W) e componente y (componente “v” do vetor velocidade – N-S). São apresentados gráficos para os valores da média das velocidades na profundidade, e para as profundidades de superfície, meio e fundo. Para estas comparações, nas séries temporais dos dados de medição de campo e resultados das simulações foi aplicado um filtro de médias móveis (média harmônica), equivalente a 5 horas. Este “alisamento” dos dados teve o objetivo de reduzir a variabilidade de alta freqüência observada nos dados.

Na seqüência são apresentados os gráficos para os períodos de verão de 2002, inverno de 2002 e inverno de 2005, respectivamente.

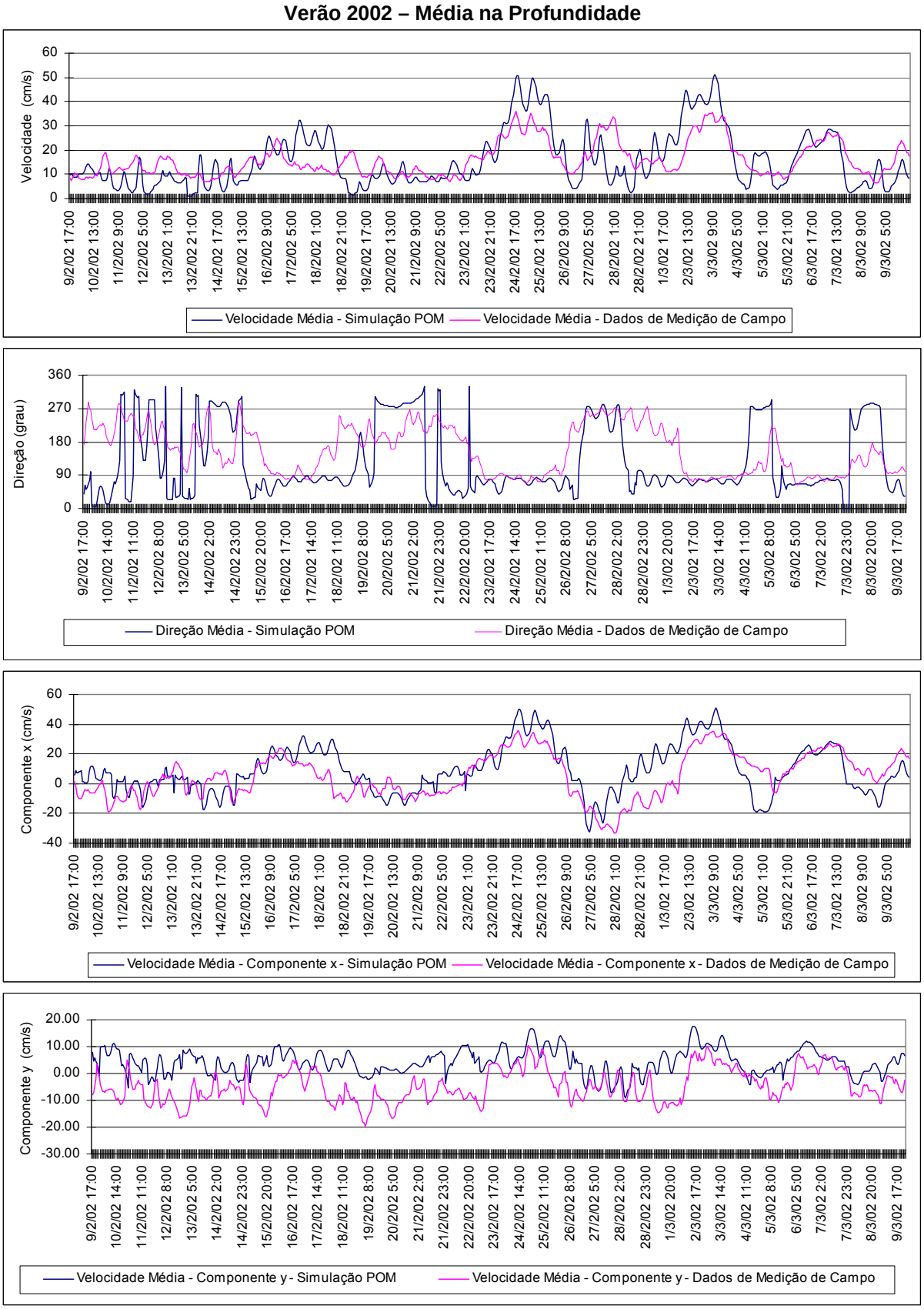


Figura 87 - Comparação entre dados de correntes medidos em campo e resultados da simulação com o POM – Verão 2002 – Velocidades Médias na Profundidade – Ponto ADCP-CODESP

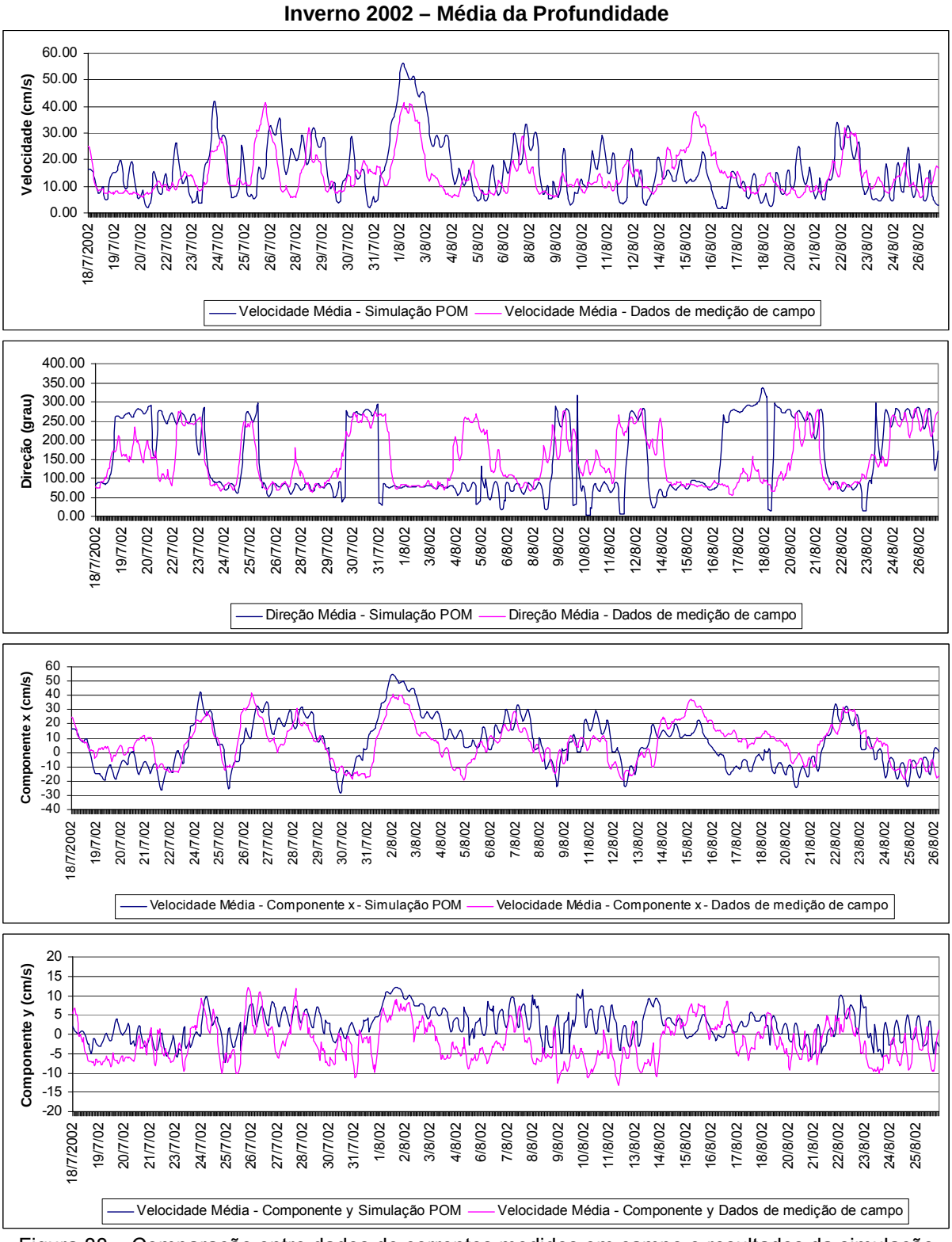


Figura 88 – Comparação entre dados de correntes medidos em campo e resultados da simulação com o POM – Inverno 2002 – Velocidade Média na Profundidade – Ponto ADCP-CODESP

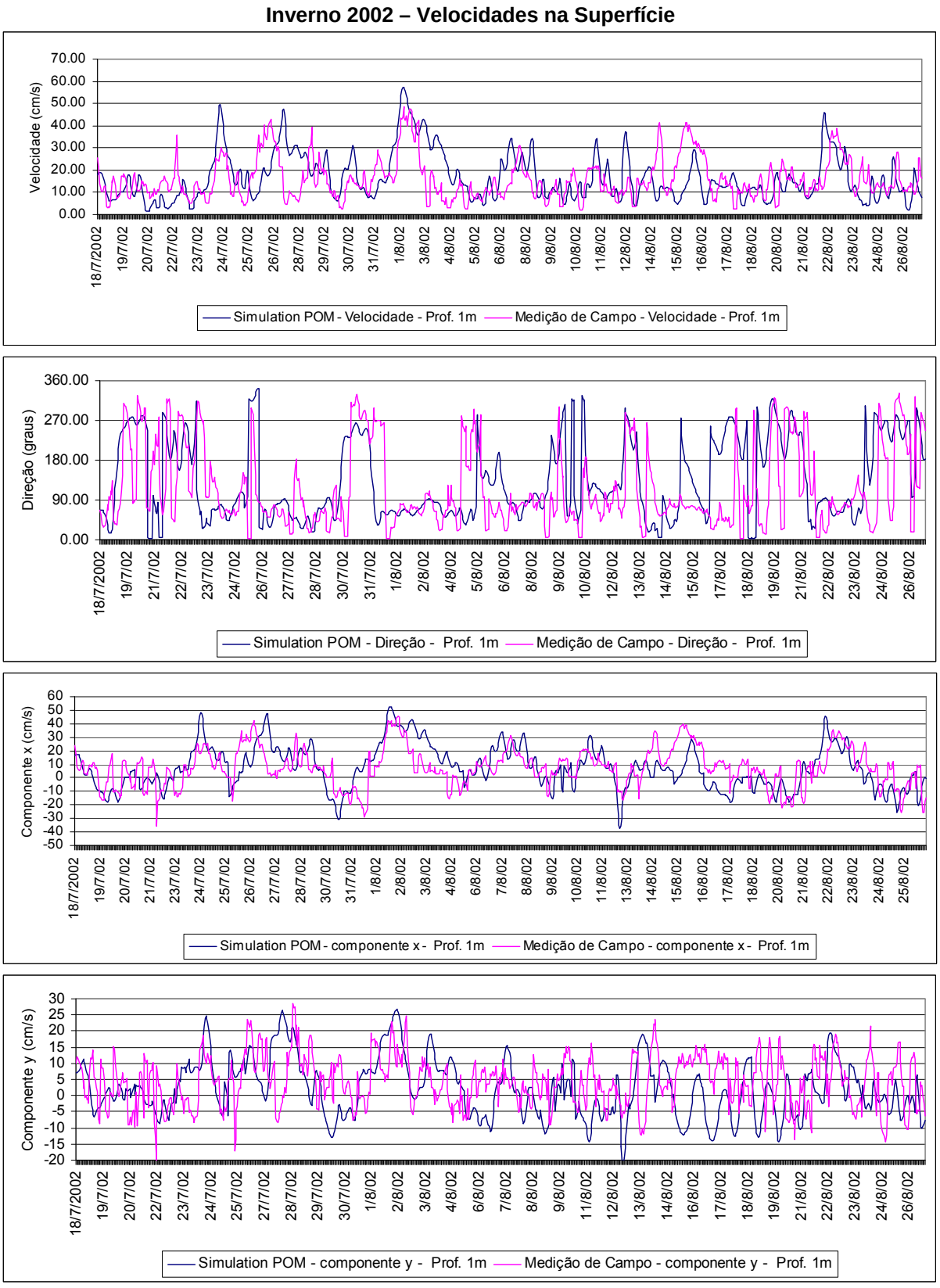


Figura 89 – Comparação entre dados de correntes medidos em campo e resultados da simulação com o POM – Inverno 2002 – Velocidades na Superfície (1 m de profundidade) – Ponto ADCP-CODESP

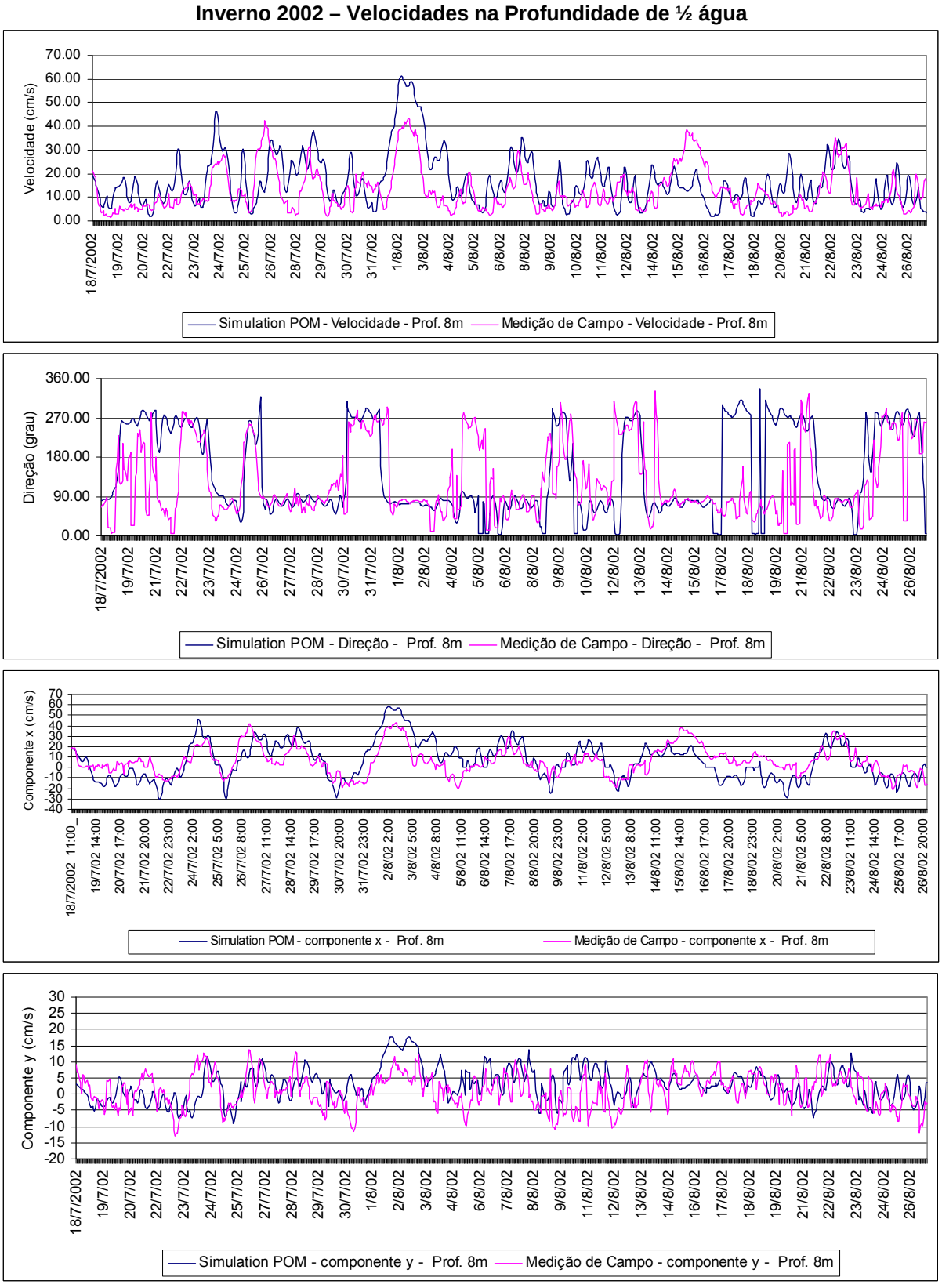


Figura 90 - Comparação entre dados de correntes medidos em campo e resultados da simulação com o POM – Inverno 2002 – Velocidades na Profundidade ½ água (8 m de profundidade) – Ponto ADCP-CODESP

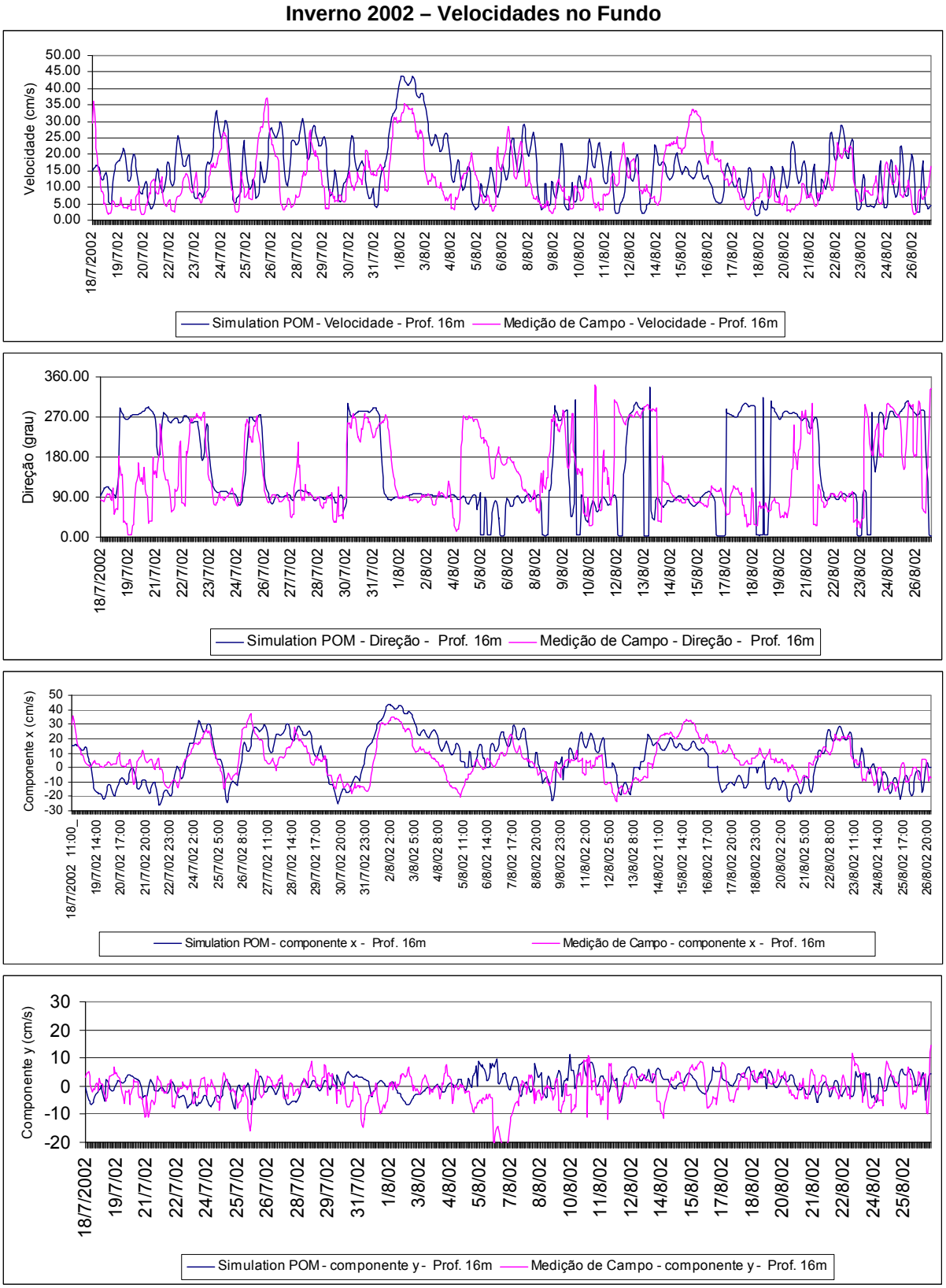


Figura 91 - Comparação entre dados de correntes medidos em campo e resultados da simulação com o POM – Inverno 2002 – Velocidades no Fundo (16 m de profundidade) – Ponto ADCP-CODESP

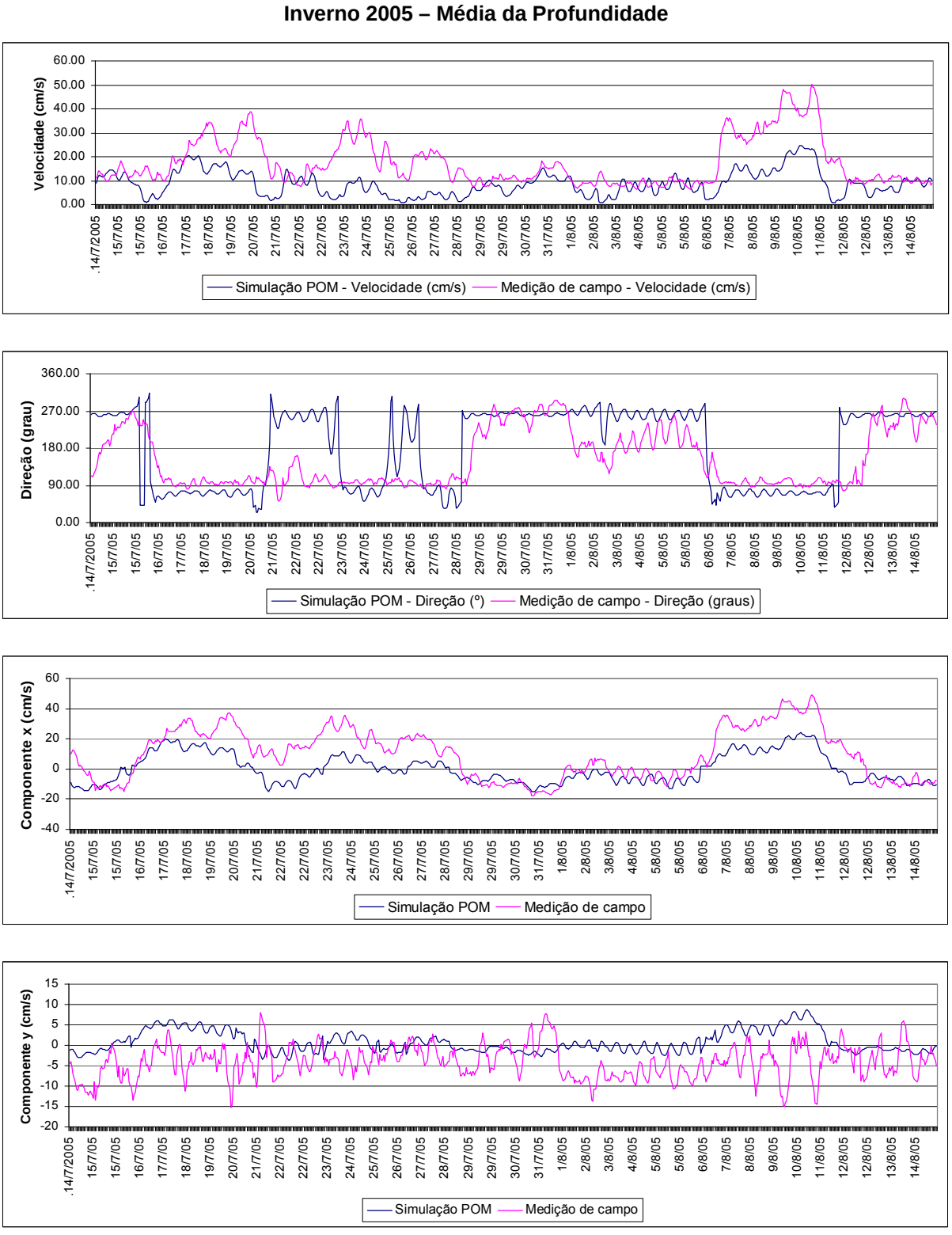


Figura 92 - Comparação entre dados de correntes medidos Velocidade Média na Profundidade – Ponto ADCP-SABESP

A seguir são apresentados os mapas de correntes para a visualização espacial dos resultados.

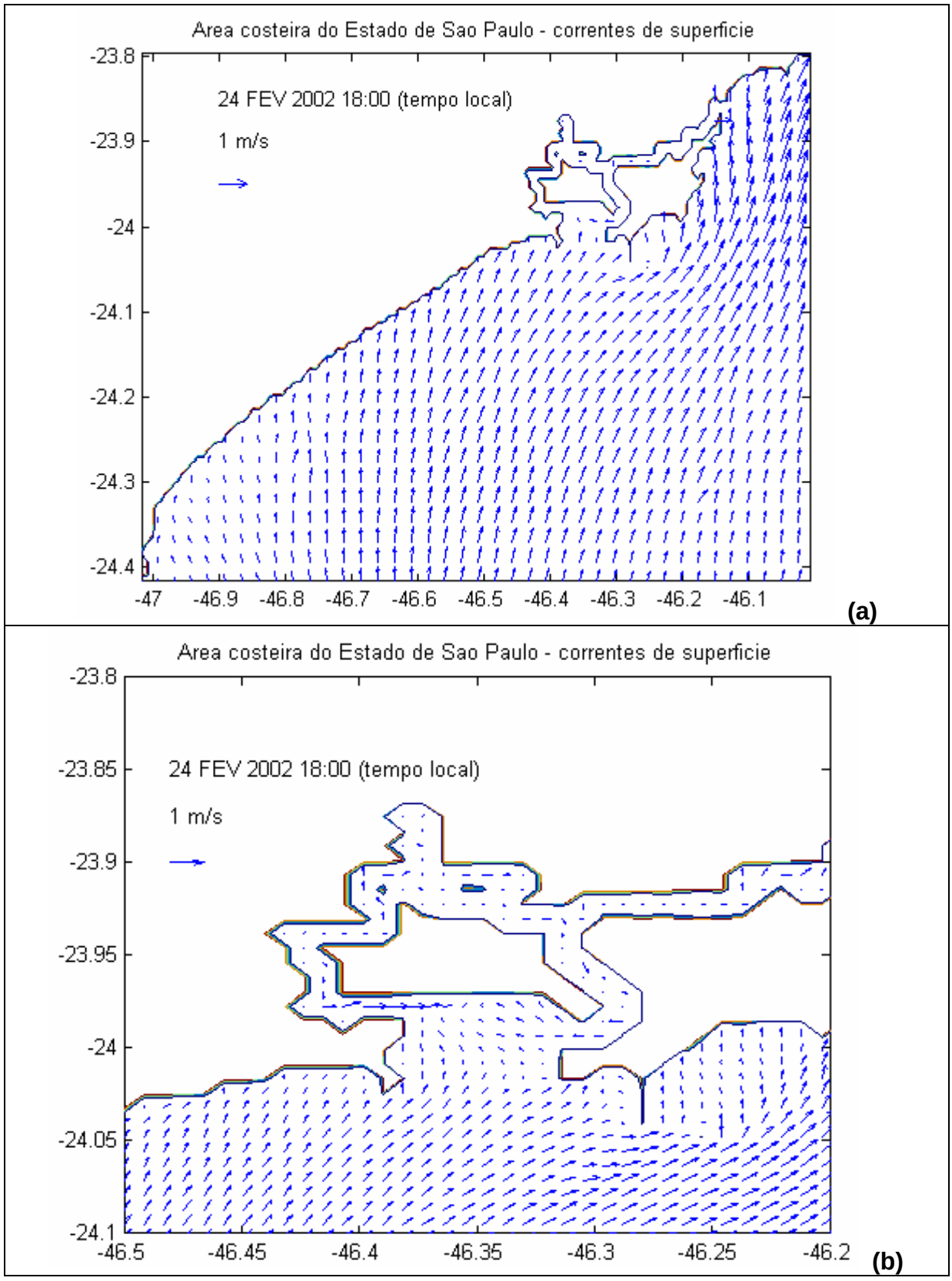


Figura 93 – Resultado da simulação do Verão de 2002 - Mapa de correntes – POM – 24/02/2002 – 18:00 h – Sizígia – Vazante

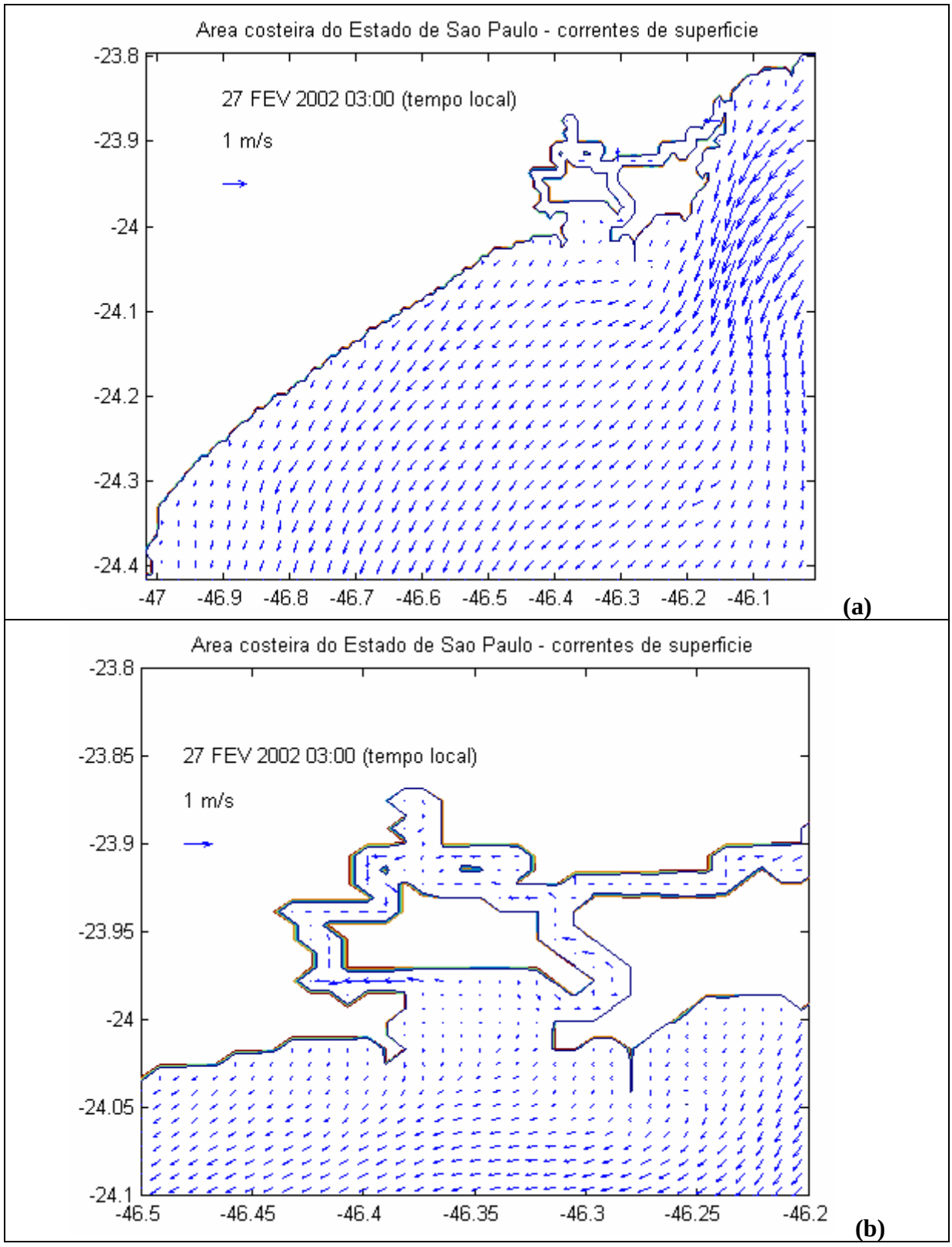


Figura 94 – Resultado da simulação do Verão de 2002 - Mapa de correntes – POM – 27/02/2002 – 7:00 h – Sizígia – Enchente

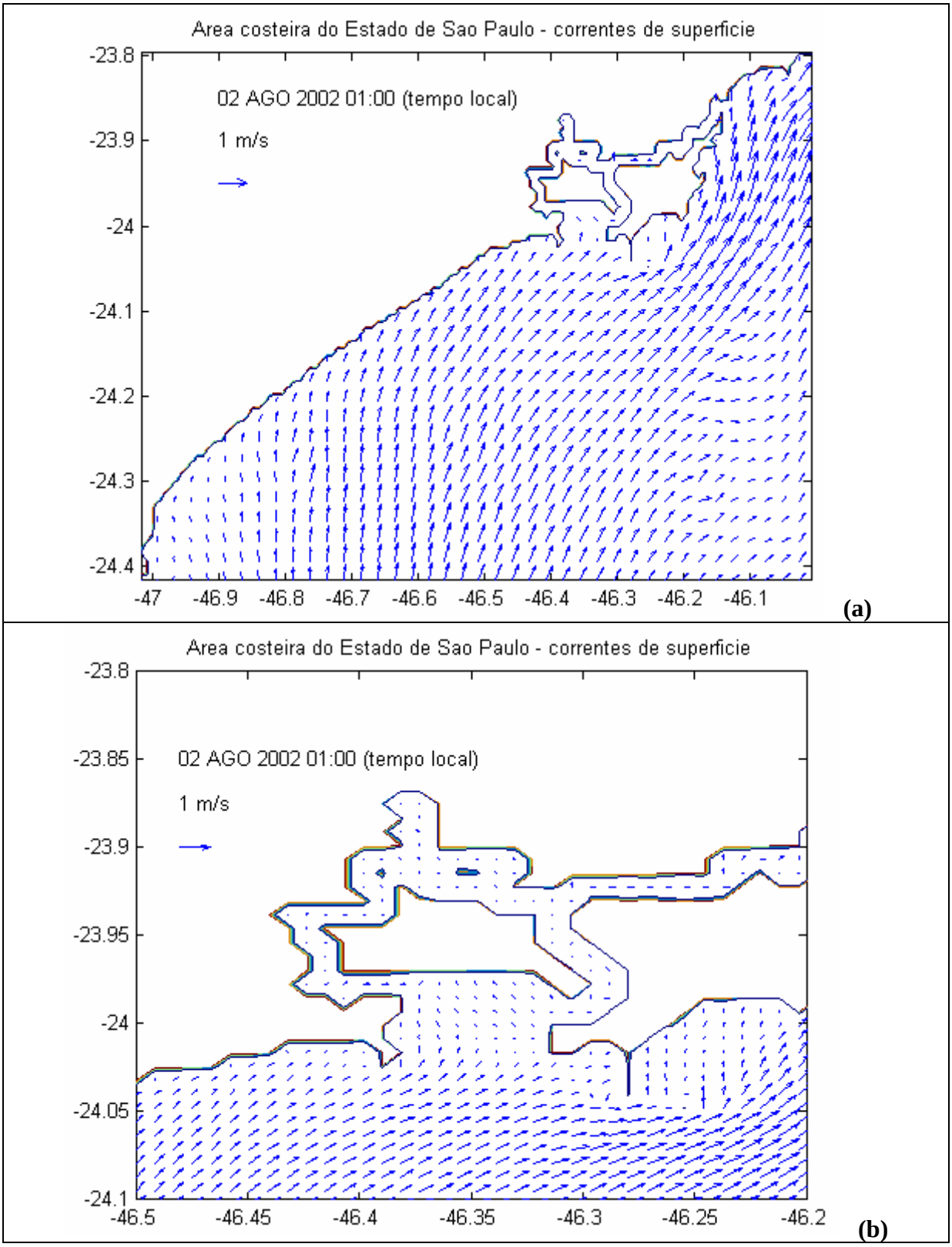


Figura 95 – Resultado da simulação do Inverno de 2002 - Mapa de correntes – POM – 02/08/2002 – 1:00 h – Quadratura – Vazante

8.2.3 Correlação dos Resultados

Na Figura 96 é apresentado o gráfico de dispersão dos valores de velocidade das correntes “Componente x” das simulações com o POM versus os valores de observação de campo para o período de 9/02/2002 a 9/03/2002. Neste gráfico é traçada a linha de tendência de regressão linear com intersecção em zero. São dados a equação da reta e o R-quadrado, que correspondem a um valor de coeficiente de correlação de 0,70.

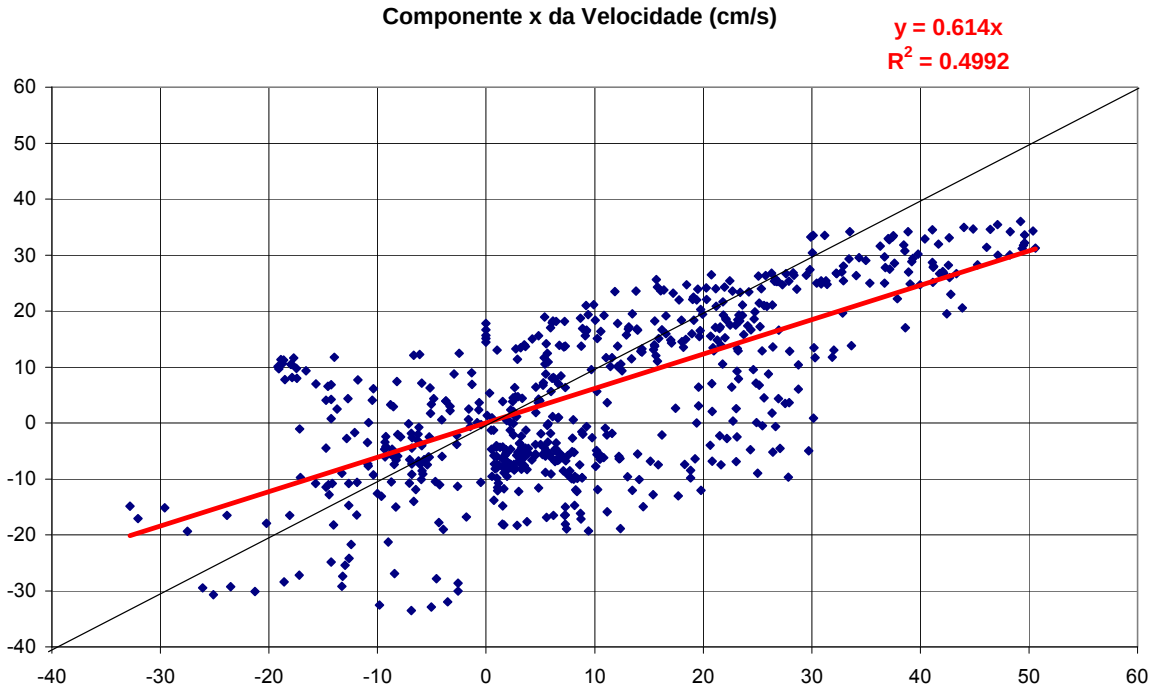


Figura 96 - Gráfico de dispersão entre os valores da ‘Componente x’ da Velocidade de Corrente entre a Simulação POM e Observações de Campo – Verão 2002 – Ponto ADCP-CODESP

Na Figura 97 e na Figura 98 apresenta-se gráficos de dispersão dos valores de velocidade das correntes “Componente x” das simulações com o POM versus os valores de observação de campo para o período de 18/07/2002 a 16/08/2002. Nestes gráficos é traçada a linha de tendência de regressão linear com intersecção em zero. São dados a equação da reta e o R-quadrado, que correspondem valores de coeficiente de correlação de 0,70 para a média da profundidade, e 0,49, 0,69 e 0,65 para a superfície, meia altura e fundo, respectivamente.

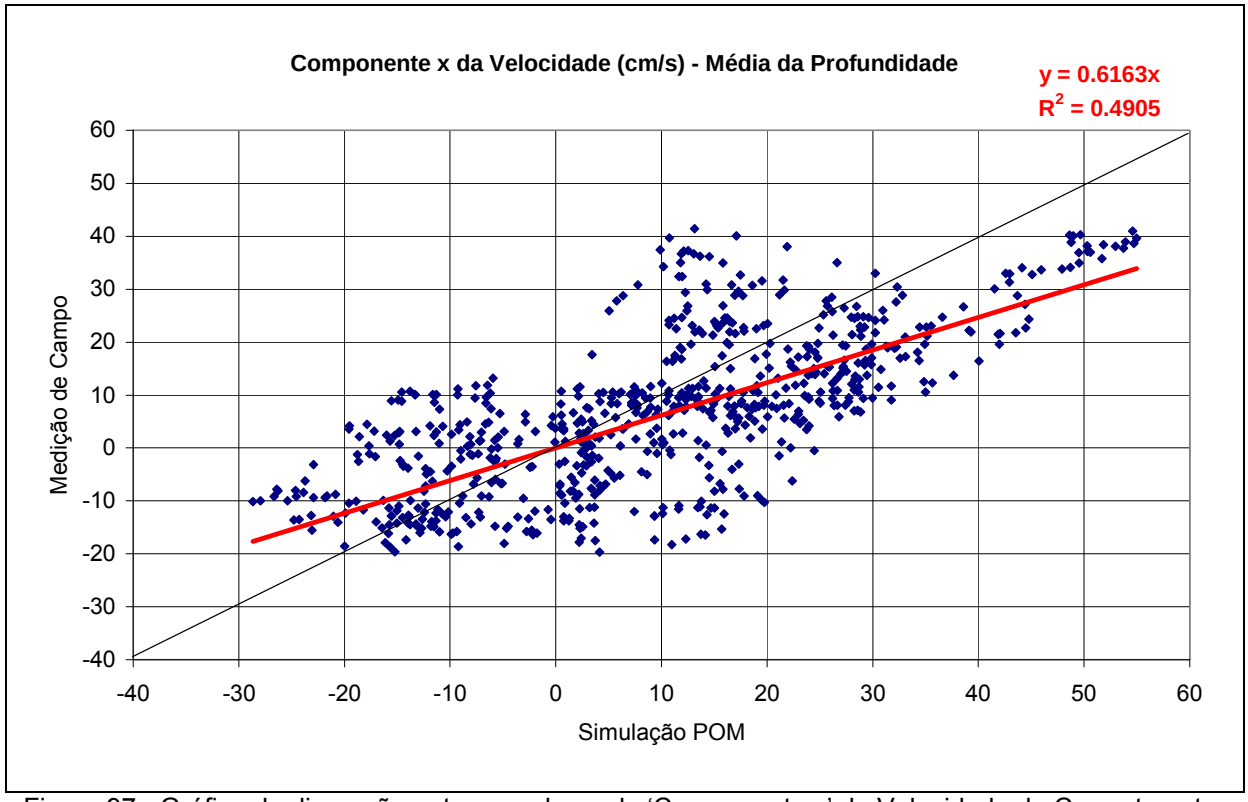


Figura 97 - Gráfico de dispersão entre os valores da 'Componente x' da Velocidade de Corrente entre a Simulação POM e Observações de Campo – Inverno 2002 – Ponto ADCP-CODESP

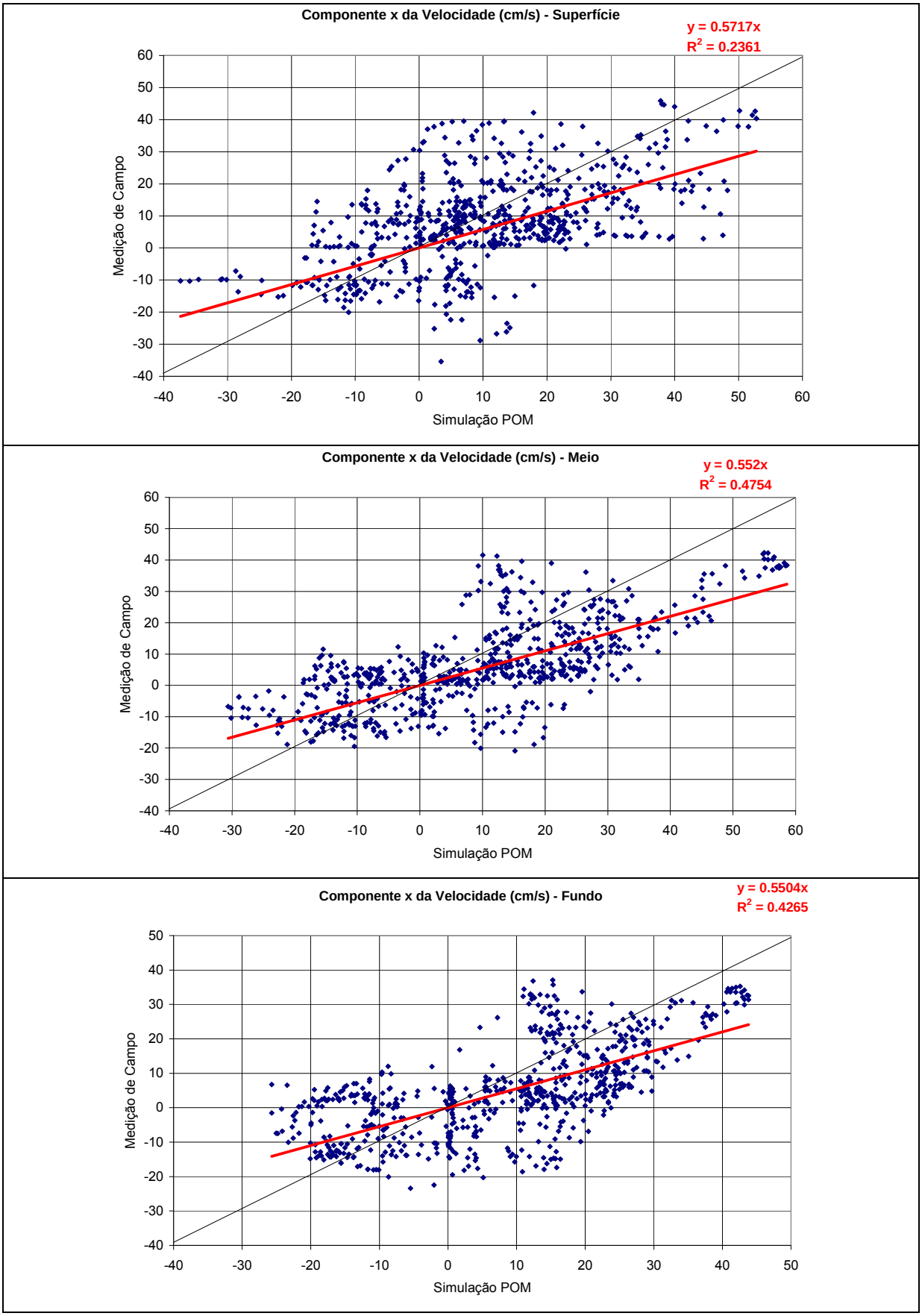


Figura 98 - Gráficos de dispersão entre os valores da 'Componente x' da Velocidade de Corrente entre a Simulação POM e Observações de Campo – Inverno 2002 – Superfície, Meia Água e Fundo – Ponto ADCP-CODESP

8.2.4 Correntes no Ponto de Lançamento do Emissário Submarino de Santos / São Vicente – POM

As séries temporais, extraídas dos resultados de simulações com o POM para as correntes no ponto de lançamento do emissário submarino de Santos / São Vicente, são apresentadas nas figuras a seguir:

Figura 99 - Velocidades e direção das correntes no Ponto de Lançamento do Emissário Submarino de Santos / São Vicente – Profundidade: Superfície, ½ água e Fundo – Verão 2002 – Simulação POM

Na Figura 100 é apresentada a velocidade média na profundidade.

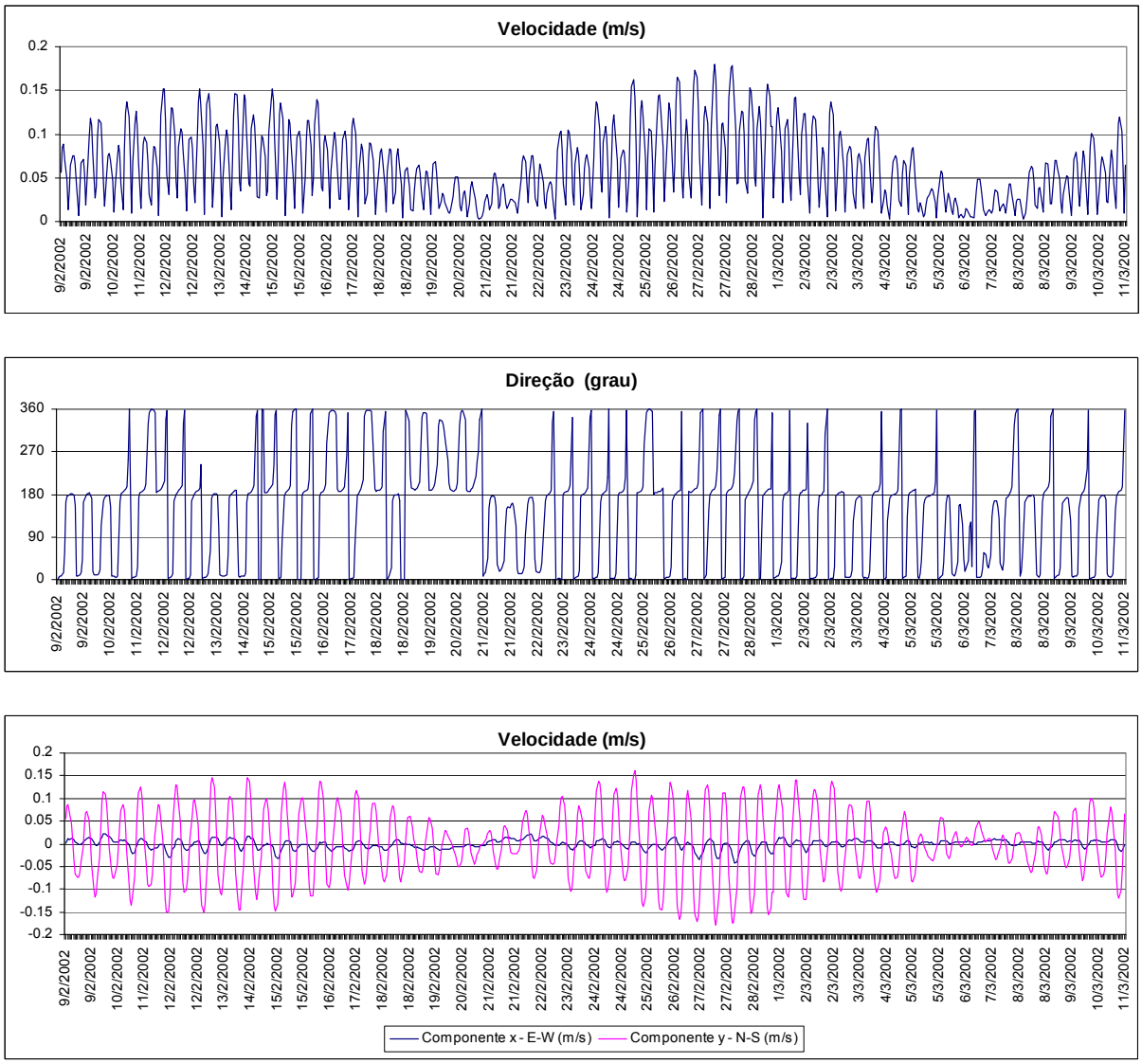


Figura 100 – Velocidades e direção das correntes no Ponto de Lançamento do Emissário Submarino de Santos / São Vicente – Média da Profundidade - Verão 2002 – Simulação POM

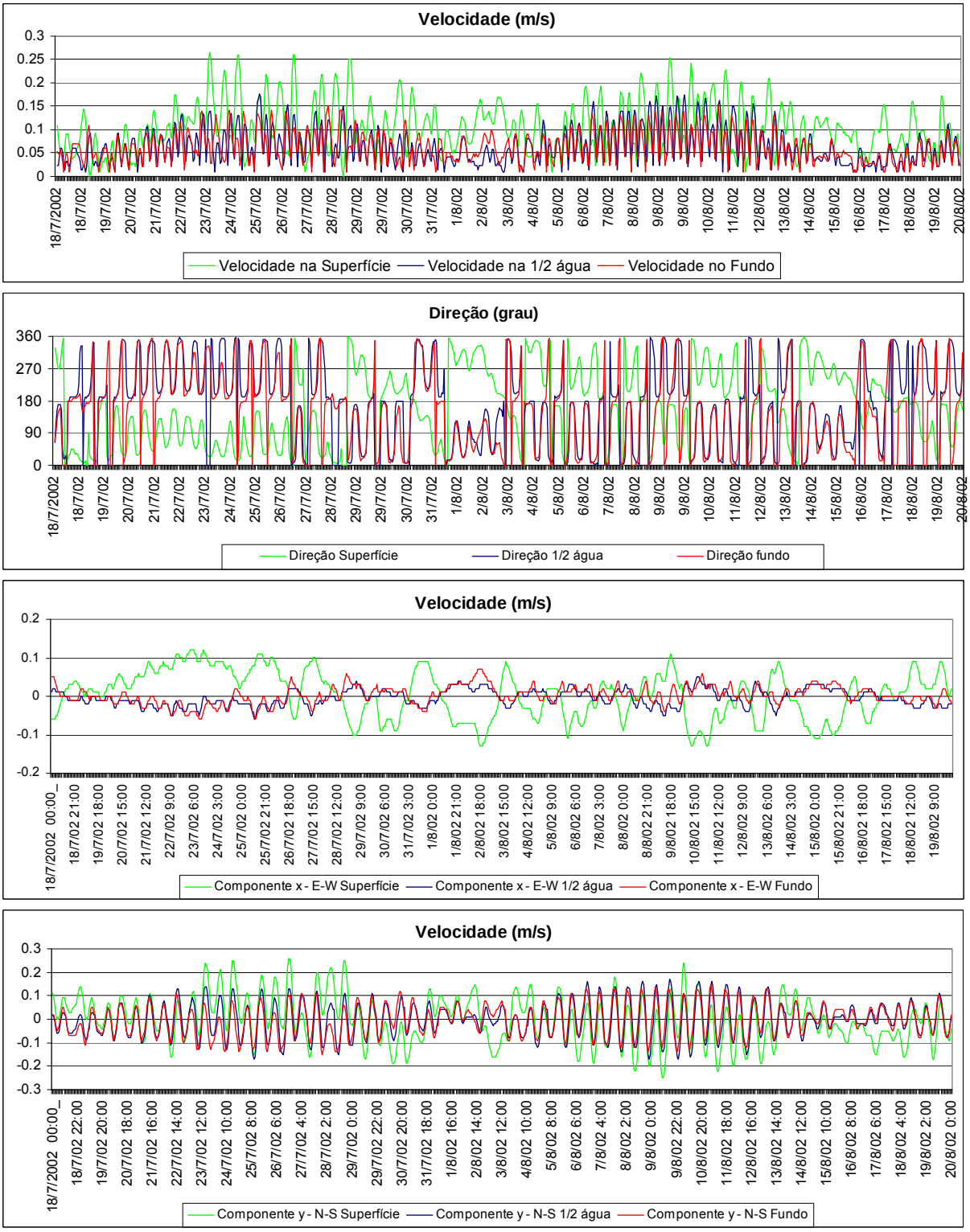


Figura 101 - Velocidades e direção das correntes no Ponto de Lançamento do Emissário Submarino de Santos / São Vicente – Profundidade: Superfície, ½ água e Fundo – Inverno 2002 – Simulação POM

Figura 102 - Velocidades e direção das correntes no Ponto de Lançamento do Emissário Submarino de Santos / São Vicente – Média da Profundidade - Inverno 2002 – Simulação POM

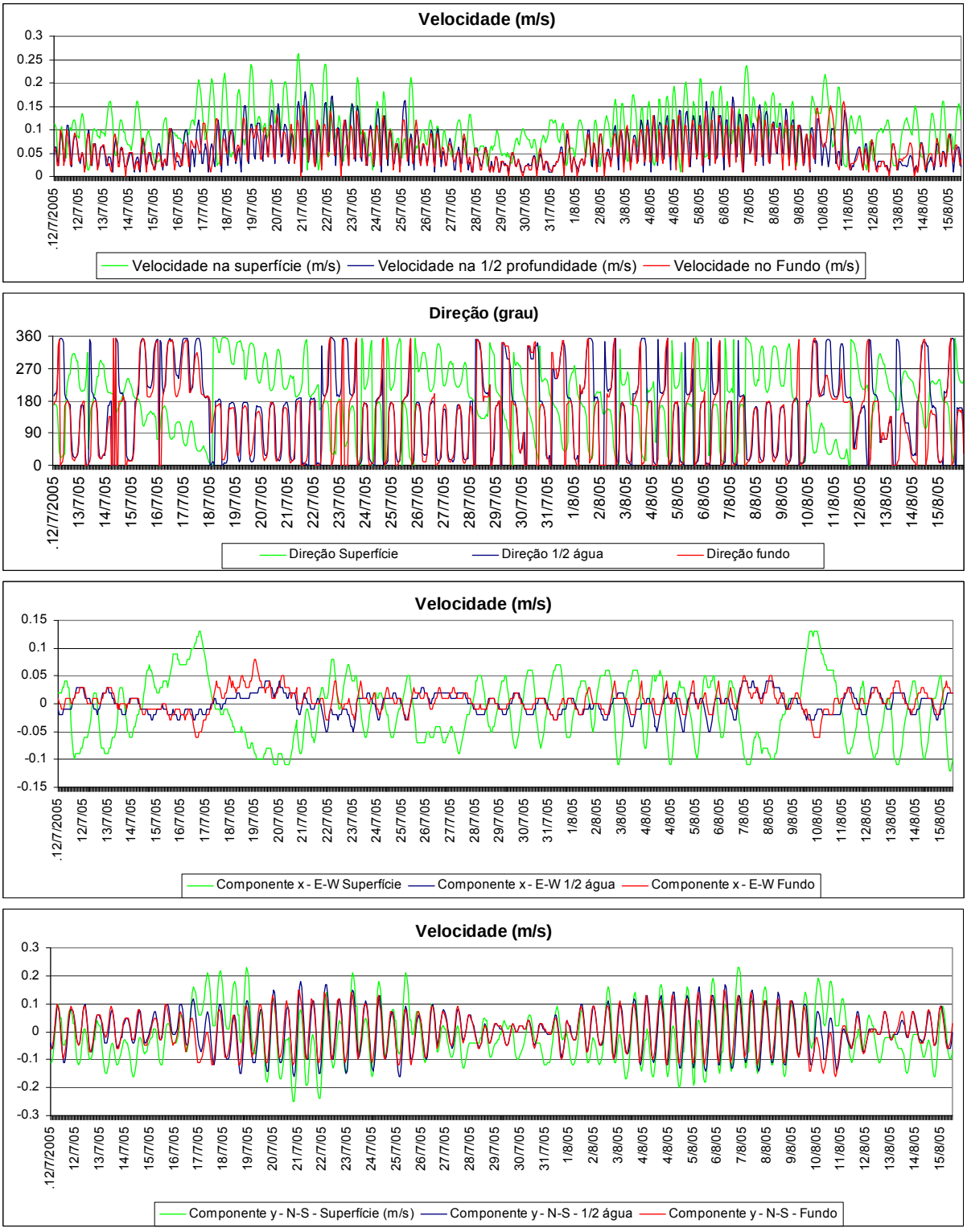


Figura 103 - Velocidades e direção das correntes no Ponto de Lançamento do Emissário Submarino de Santos / São Vicente – Profundidade: Superfície, ½ água e Fundo - Inverno 2005 – Simulação POM

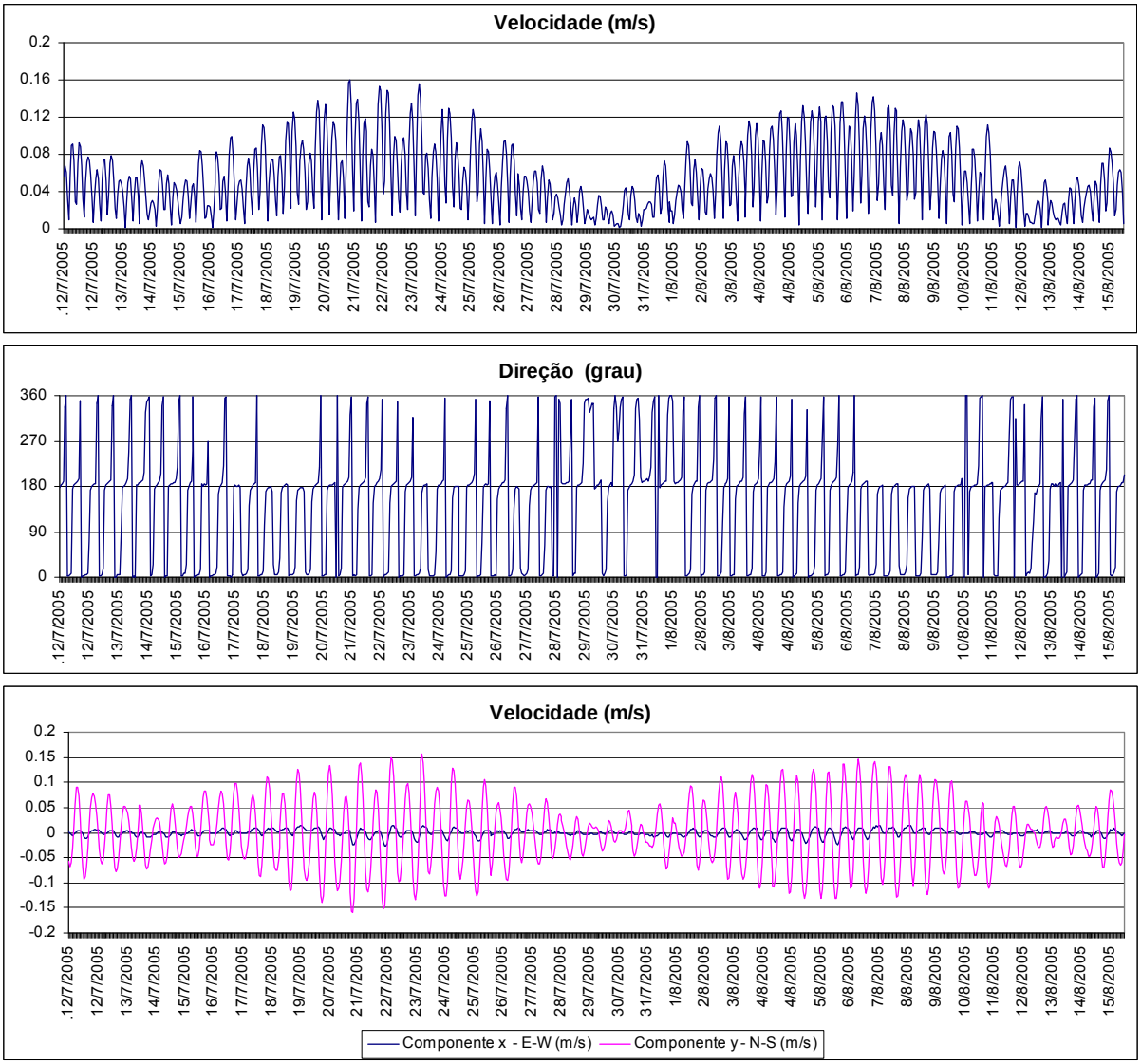


Figura 104 - Velocidades e direção das correntes no Ponto de Lançamento do Emissário Submarino de Santos / São Vicente – Média da Profundidade – Inverno 2005 – Simulação POM

8.3 Simulações com o DELFT3D

8.3.1 Simulações de Calibração

Para a inicialização, e familiarização com o modelo Delft3D-Flow foram efetuadas simulações prévias utilizando:

- o módulo bi-dimensional com maré, e com maré e vento;
- o módulo tri-dimensional com maré, e com maré e vento;
- a não consideração dos parâmetros salinidade e temperatura;
- a consideração dos parâmetros salinidade e temperatura e sua variação;
- a variação dos coeficientes de atrito do vento e o de Manning.

Foram escolhidos como parâmetros de calibração os coeficientes de atrito do vento e o coeficiente de Manning, por terem se mostrados parâmetros mais sensíveis durante as simulações prévias. A seguir são apresentados os cenários considerados e os gráficos resultantes das simulações de calibração. Foram efetuadas simulações para o período de 23/07/2005 a 15/08/2005, no entanto o período de 5/8/2005 a 8/5/2005 de melhor ajuste foi usado para a calibração. Na Tabela 12 estão apresentados os valores utilizados na calibração e na Figura 105 os resultados.

Tabela 12 – Parâmetros utilizados na calibração – Delft3D

Cenário	Coeficiente de Atrito	Coeficiente de Manning
Simulação 1	0,010	0,04
Simulação 2	0,008	0,05
Simulação 3	0,007	0,05
Simulação 4	0,009	0,05
Simulação 5	0,009	0,06
Simulação 6	0,010	0,03
Simulação 7	0,009	0,03
Simulação 8	0,010	0,04

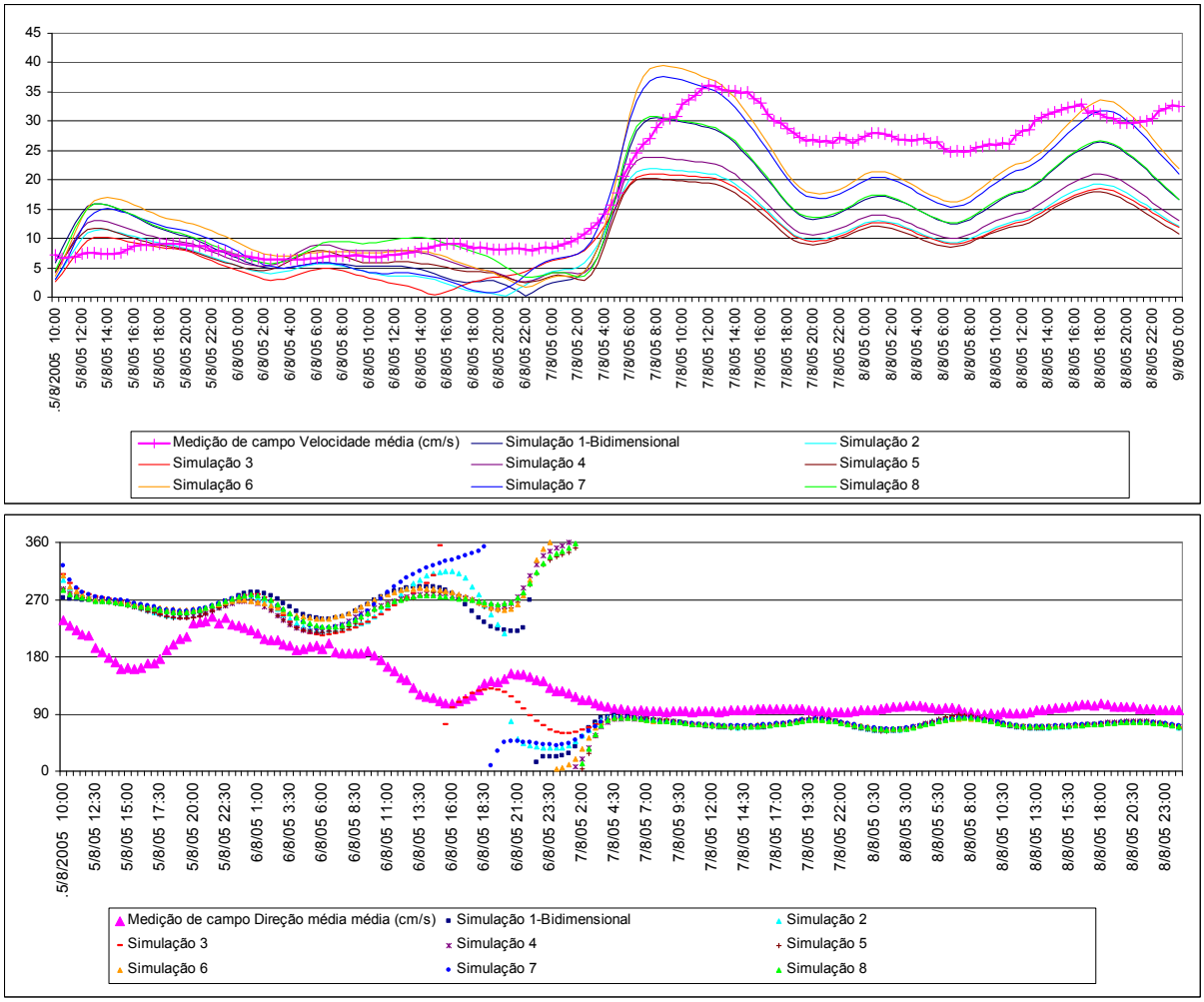


Figura 105 – Gráfico de calibração do modelo Delft3D

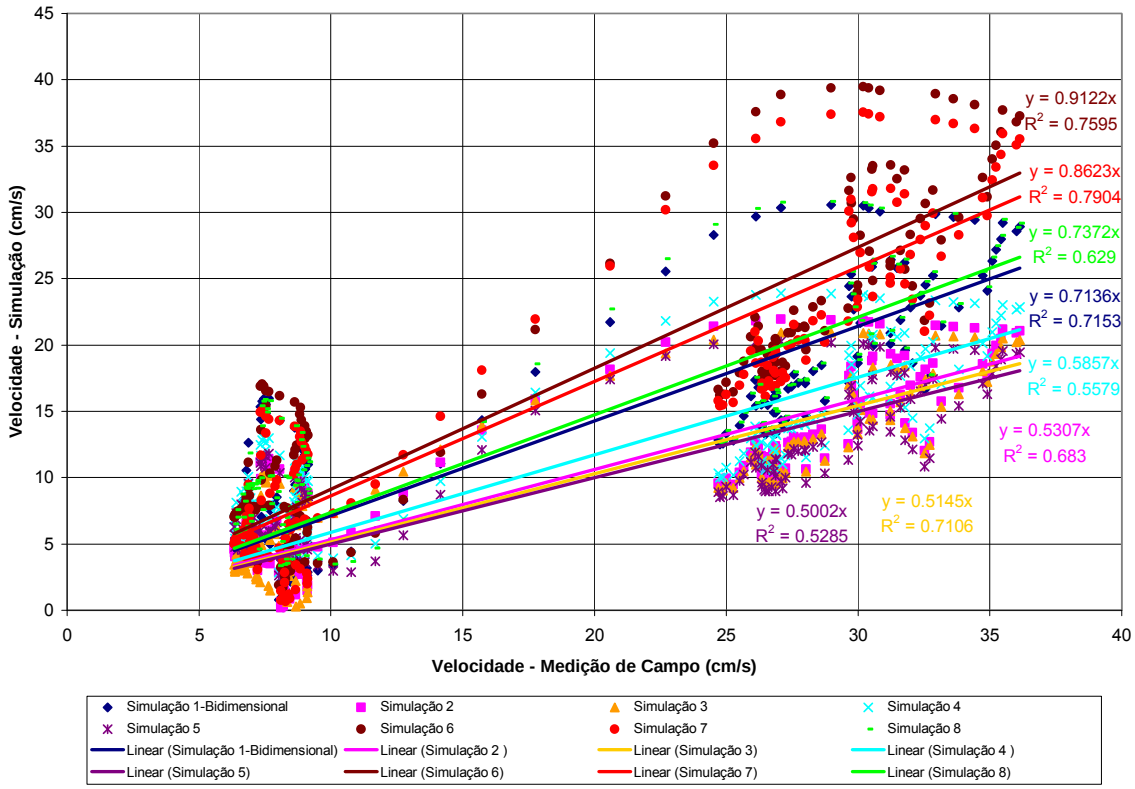


Figura 106 - Gráfico de dispersão entre os valores da Velocidade de Corrente entre a Simulação Delft3D e Observações de Campo – Inverno 2005 - Calibração

Na Figura 106 é apresentado o gráfico de dispersão dos valores de velocidade das correntes das simulações com o Delft3D versus os valores de observação de campo. Neste gráfico são traçadas as linhas de tendência de regressão linear com intersecção em zero. Para cada situação de simulação são dados as equações da reta e o R-quadrado, os quais correspondem a um valor de coeficiente de correlação, quais sejam:

Tabela 13 – Coeficientes de correlação para as simulações de calibração do Delft3D

Simulação	R-quadrado	R
Simulação 1	0,7153	0,85
Simulação 2	0,6830	0,83
Simulação 3	0,7106	0,84
Simulação 4	0,5579	0,75
Simulação 5	0,5285	0,73
Simulação 6	0,7595	0,87
Simulação 7	0,7904	0,89
Simulação 8	0,6290	0,79

Para as simulações subseqüentes foram utilizados os valores de coeficiente de atrito de 0,009 e coeficiente de Manning 0,03 (Simulação 7).

8.3.2 Elevação da Superfície

Na Figura 107 são apresentados os gráficos de comparação entre os resultados extraídos da simulação e os dados de medição de campo para a elevação da superfície (maré), para os três períodos simulados. O ponto de medição está localizado na Ilha das Palmas (ver Figura 19 e Tabela 6).

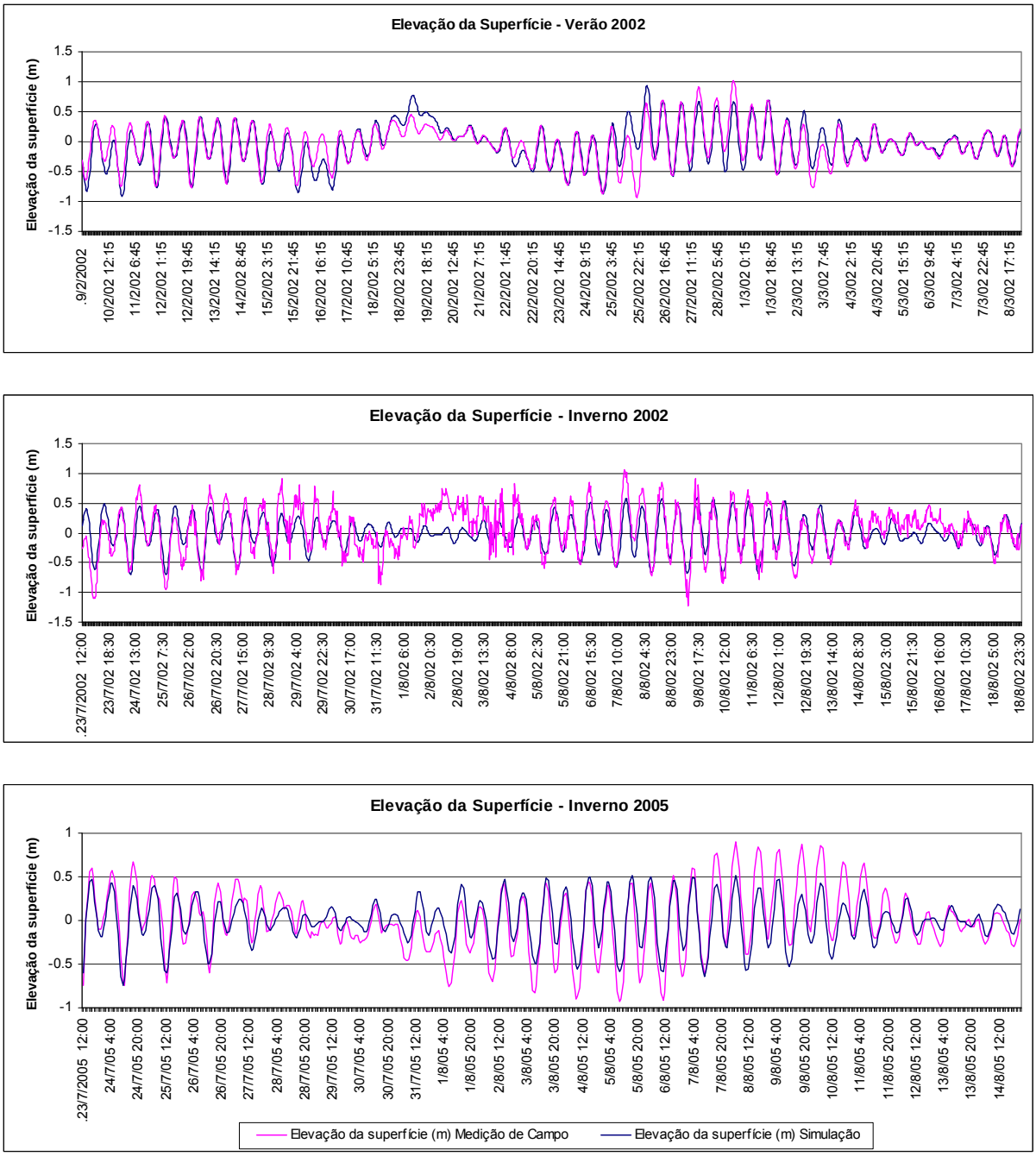


Figura 107 – Comparação de valores de elevação da superfície entre a Simulação com o Delft3D e os valores de Observações de Campo

Na Figura 108 são apresentados os gráficos de dispersão dos valores de elevação da superfície das simulações com o Delft3D versus os valores de observação de campo. Nestes gráficos são traçadas as linhas de tendência de regressão linear com intersecção em zero. Para cada período são dados as equações da reta e o R-quadrado, os quais correspondem a um valor de coeficiente de correlação, quais sejam: 0,88 para verão de 2002, 0,80 para inverno de 2002 e 0,83 para o inverno de 2005.

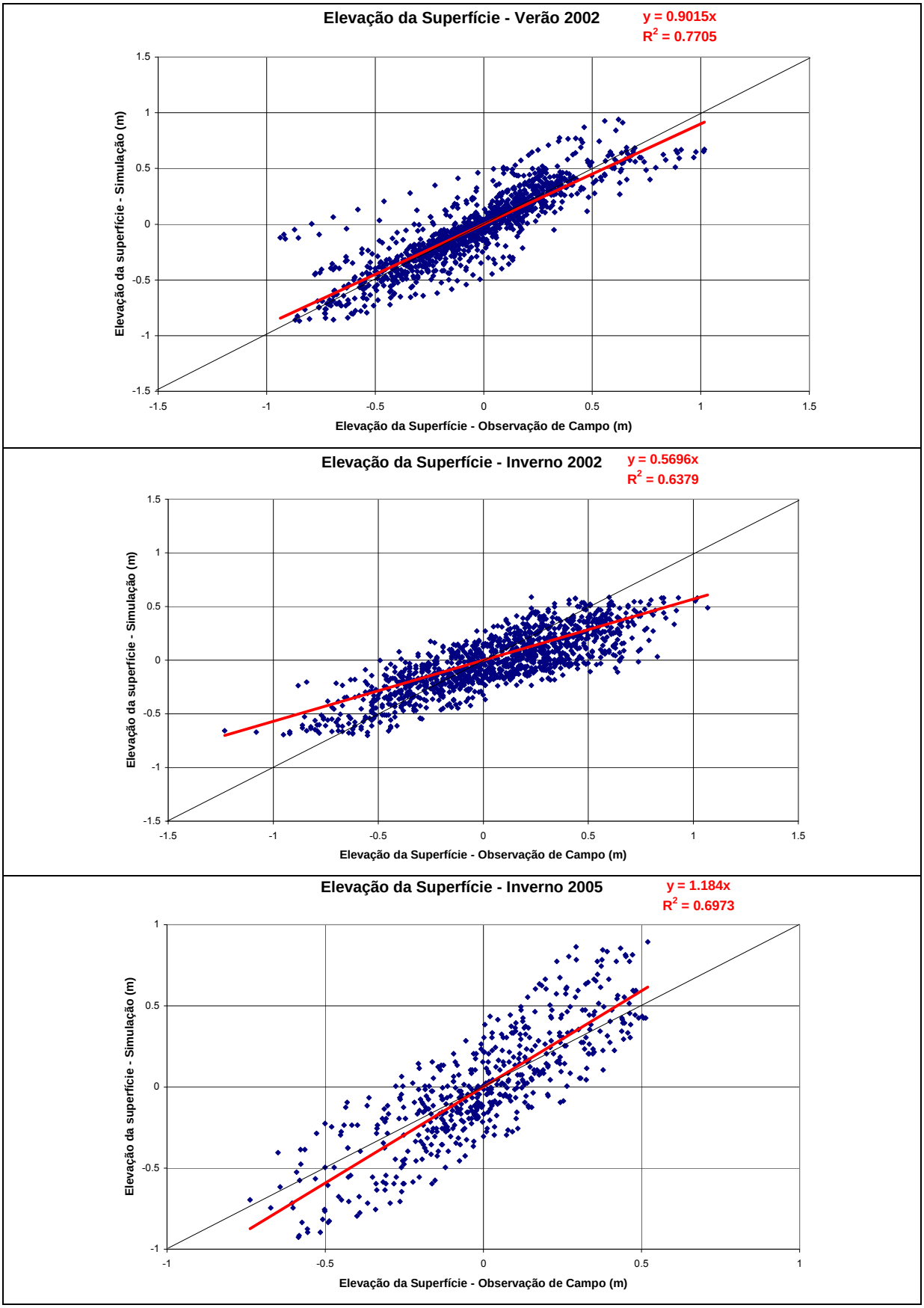


Figura 108 - Gráficos de dispersão entre os valores de elevação da superfície entre a Simulação Delft3D e Observações de Campo

8.3.3 Resultados das Simulações - Correntes

Na seqüência são apresentados os gráficos de comparação entre os resultados das simulações e as medições de campo, com relação as correntes. Os gráficos são divididos em velocidade, direção, componente x (componente “u” do vetor velocidade - E-W) e componente y (componente “v” do vetor velocidade – N-S). São apresentados gráficos para os valores da média das velocidades na profundidade. Para estas comparações, nas séries temporais dos dados de medição de campo foi aplicado um filtro de médias móveis (média harmônica), equivalente a 5 horas. Este “alisamento” dos dados teve o objetivo de reduzir a variabilidade de alta freqüência observada nos dados.

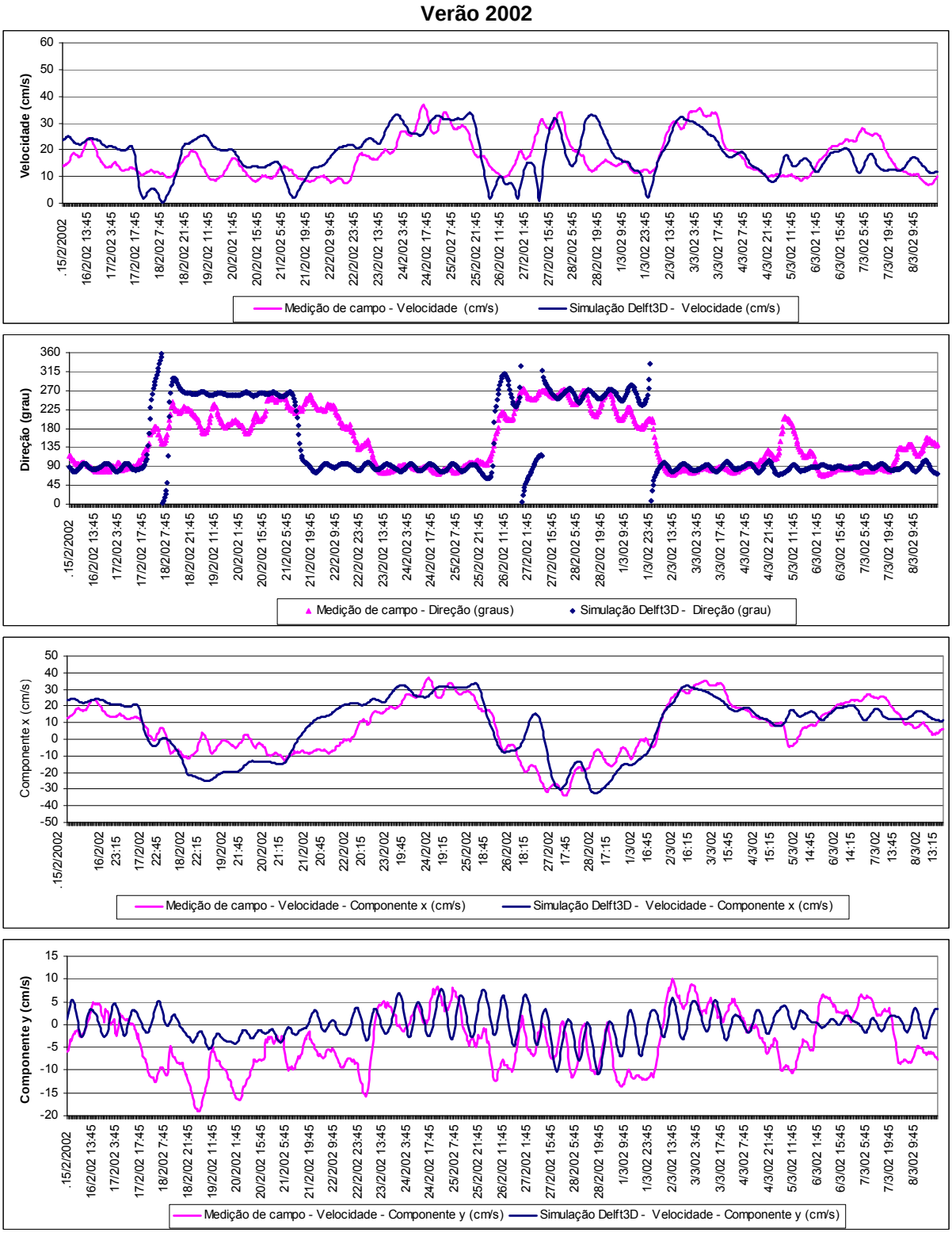


Figura 109 - Comparação entre dados de correntes medidos em campo e resultados da simulação com o Delft3D – Ponto ADCP-CODESP – Verão 2002 – Velocidades na Profundidade Média

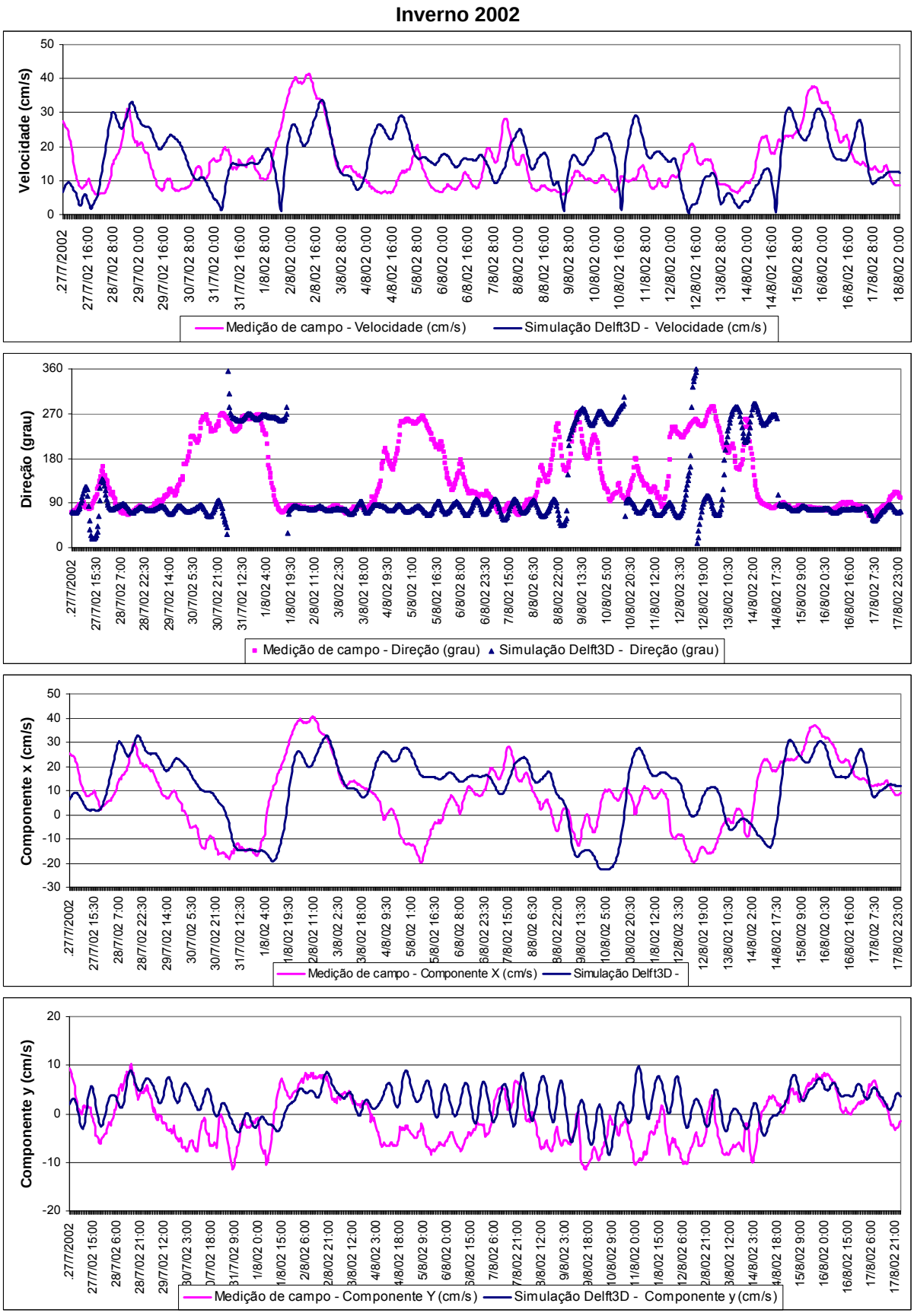


Figura 110 - Comparação entre dados de correntes medidos em campo e resultados da simulação com o Delft3D – Ponto ADCP-CODESP – Inverno 2002 – Velocidades na Profundidade Média

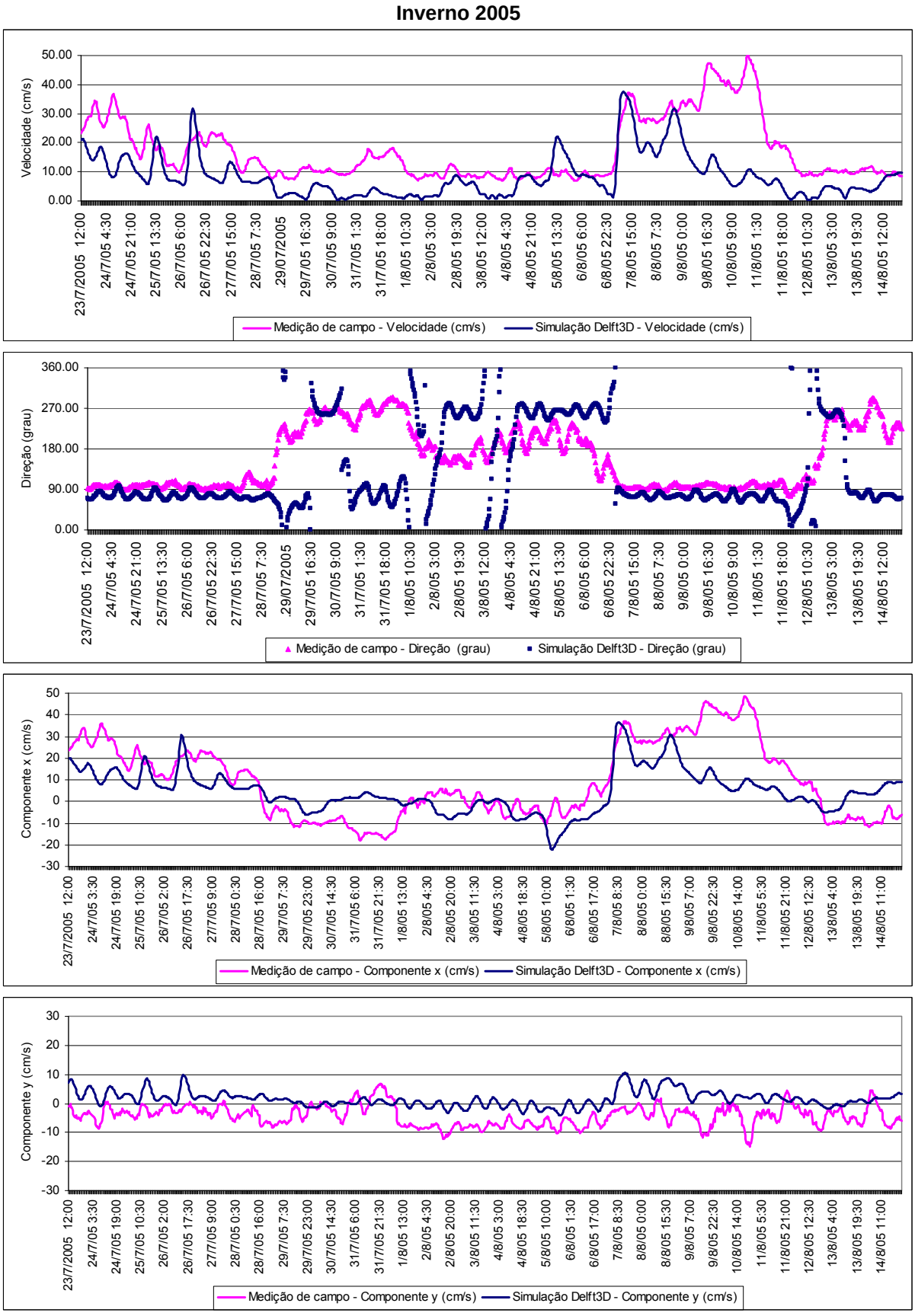
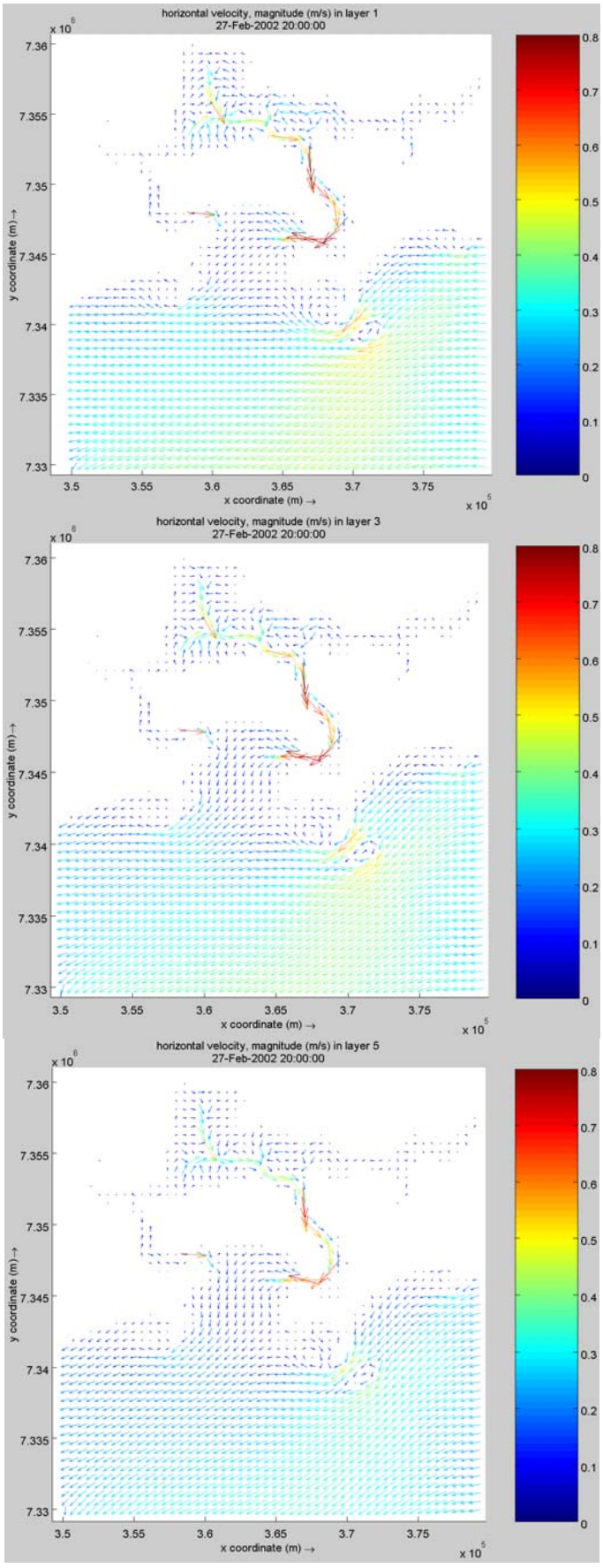


Figura 111 - Comparação entre dados de correntes medidos em campo e resultados da simulação com o Delft3D – Inverno 2005 – Velocidades na Profundidade Média

Para a visualização espacial dos resultados, são apresentados, a seguir, os mapas de corrente de alguns instantes extraídos dos períodos simulados. Estão apresentados na seqüência: verão 2002, inverno 2002 e inverno 2005.



(a)

(b)

(c)

Figura 112 - Resultado da simulação do Verão de 2002 – Mapas de correntes Delft3D – (27/07/02 – 20:00 h – Sizígia – Vazante) – (a) Superfície, (b) ½ Água e (c) Fundo

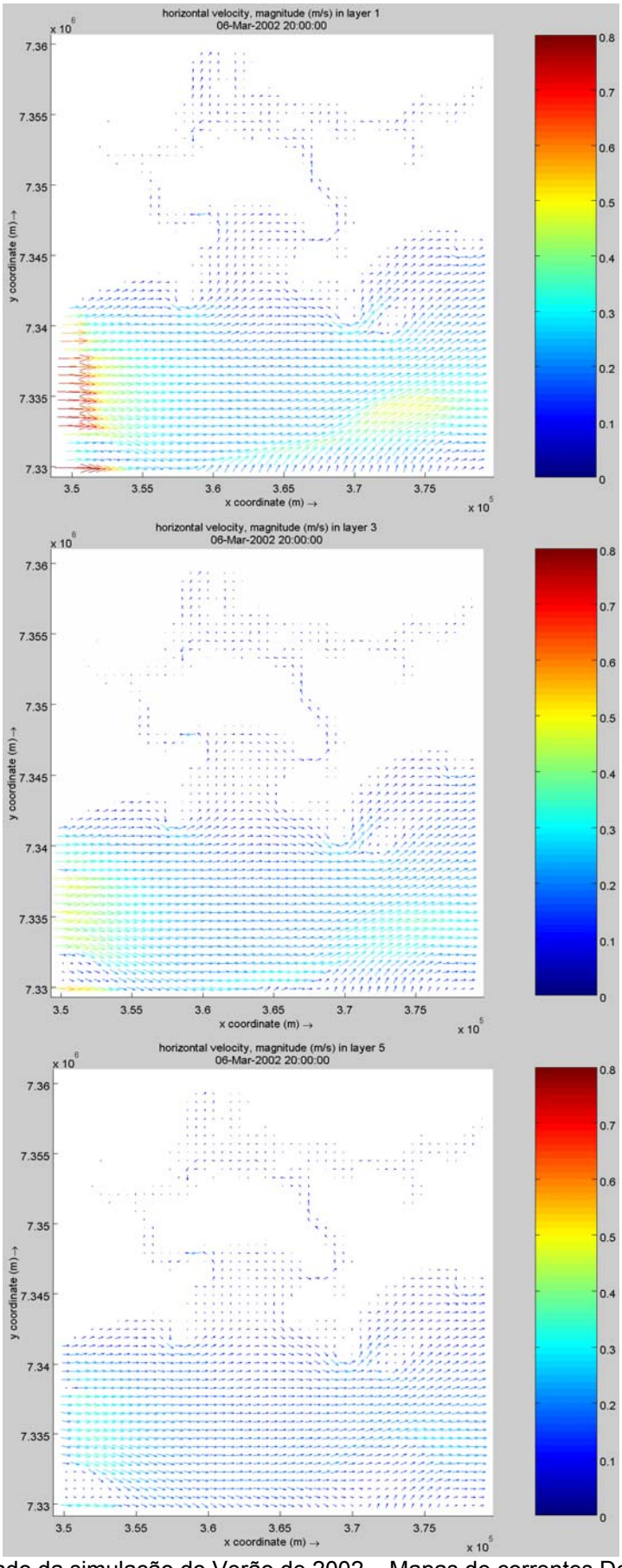
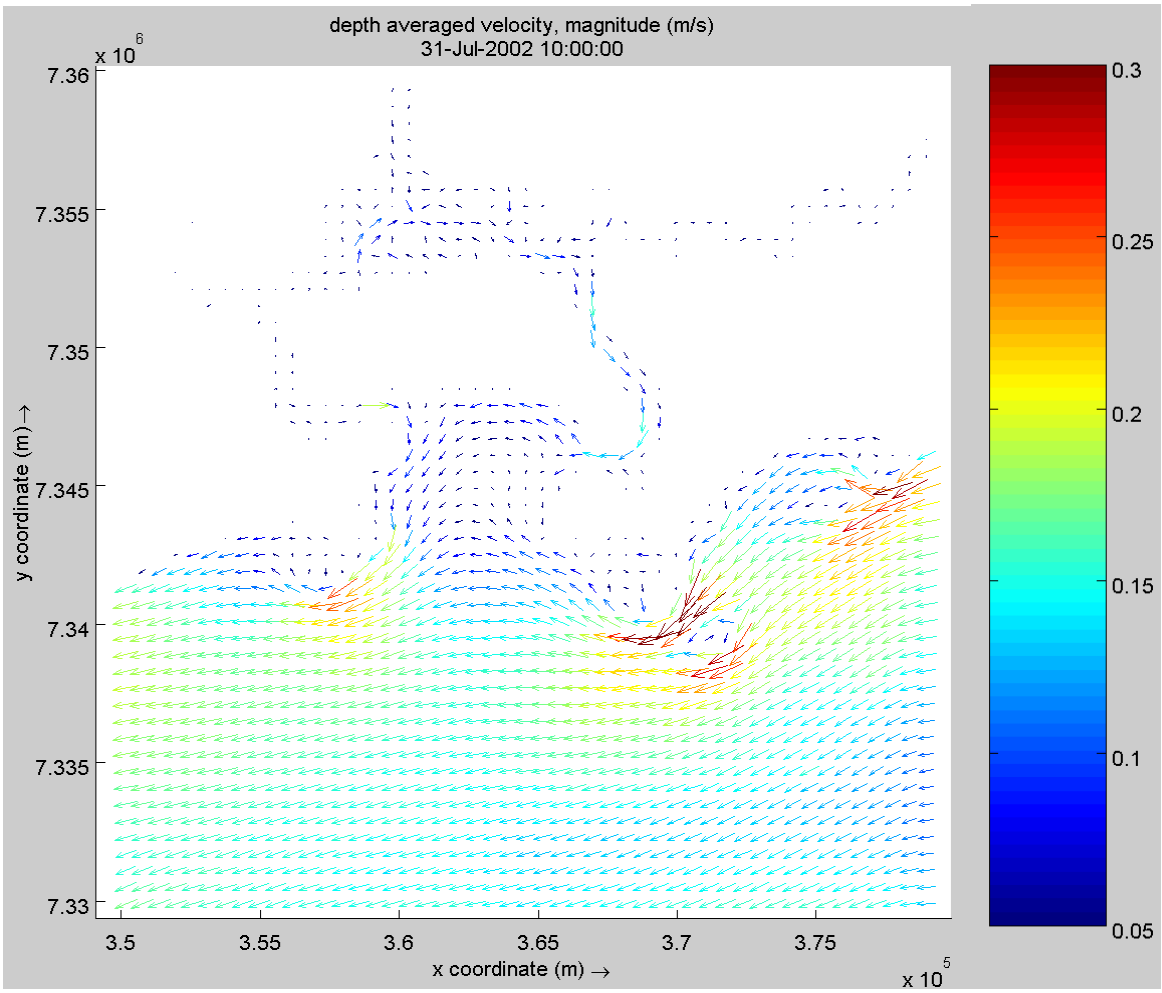
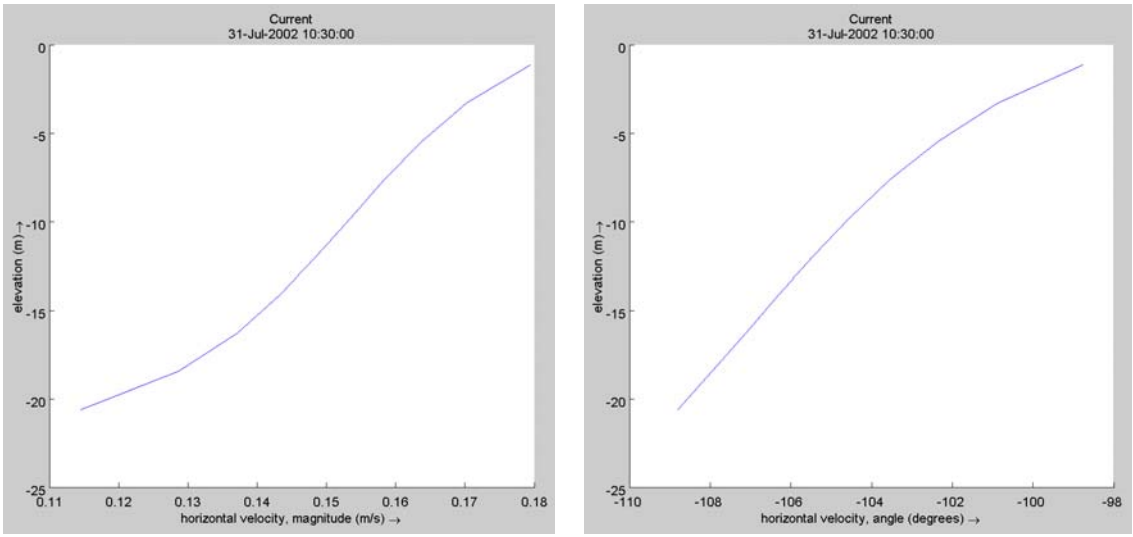


Figura 113 - Resultado da simulação do Verão de 2002 – Mapas de correntes Delft3D – (06/03/02 – 20:00 h – Quadratura – Enchente) – Superfície, ½ Água e Fundo



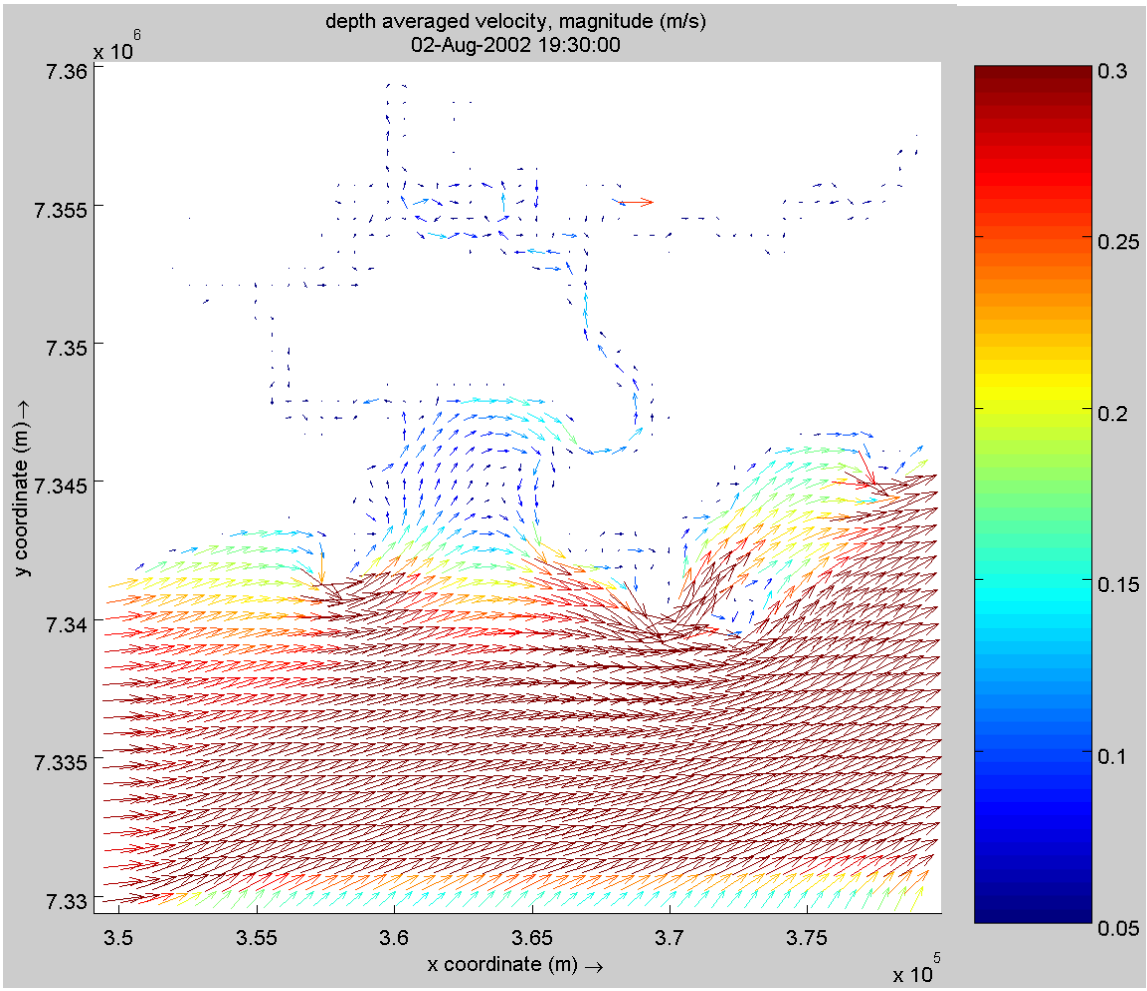
(a)



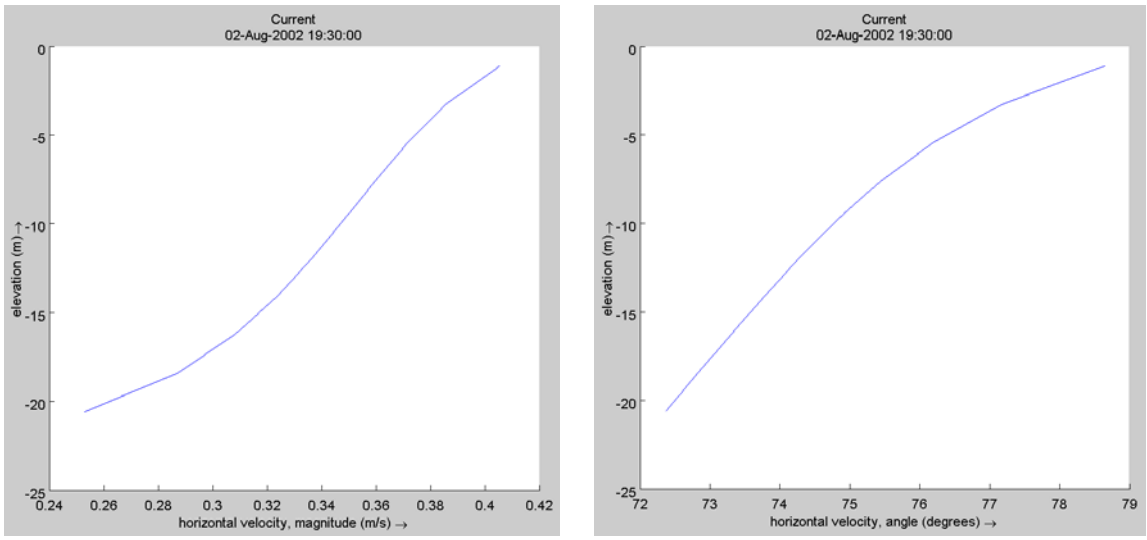
(b)

Figura 114 - Resultado da simulação do Inverno de 2002 – (a) Mapa de correntes Delft3D – (31/07/02 – 10:30 h – Quadratura – Vazante) – (b) Perfil da velocidade no Ponto ADCP-CODESP

Para os perfis de direção extraídos do Delft3D deve-se somar 360º para as direções menores que zero.

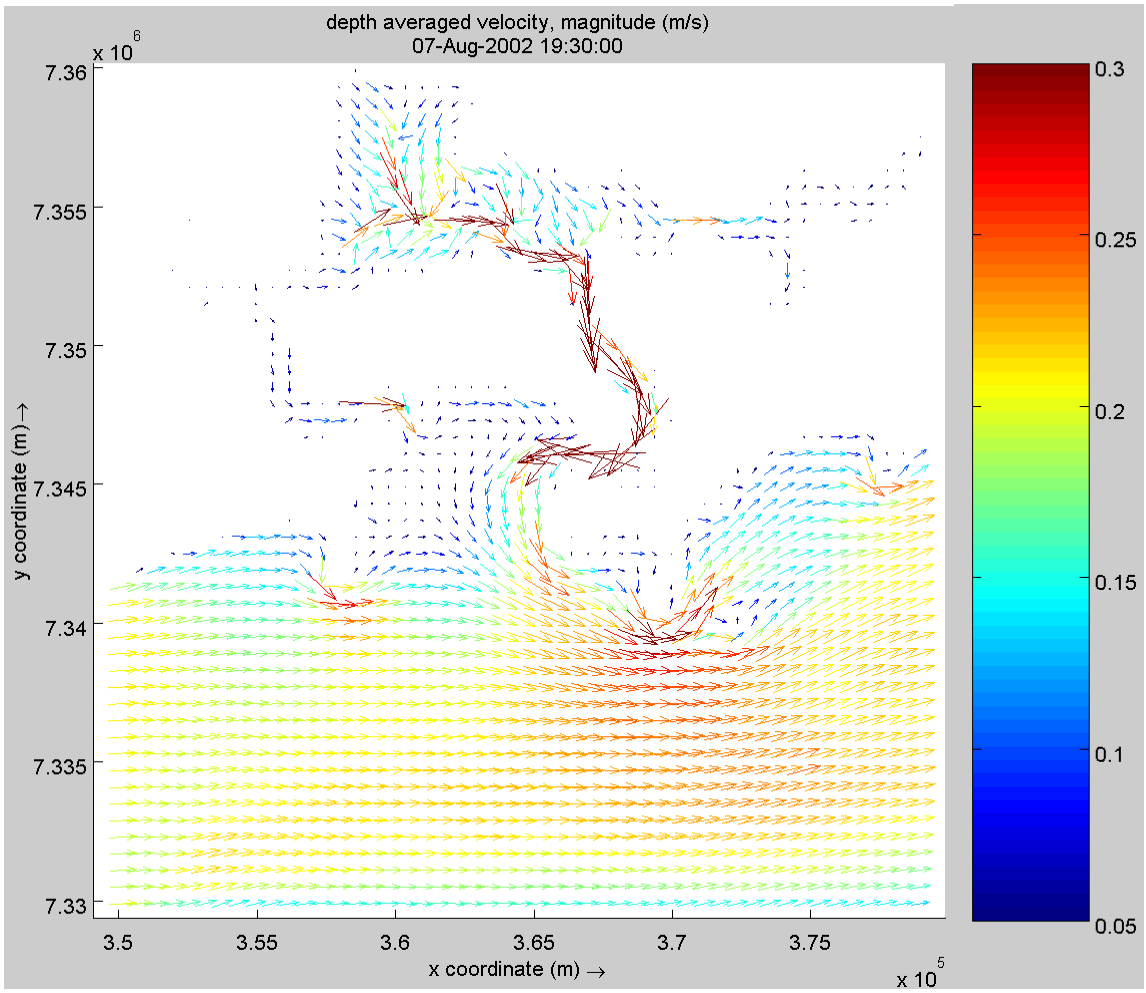


(a)

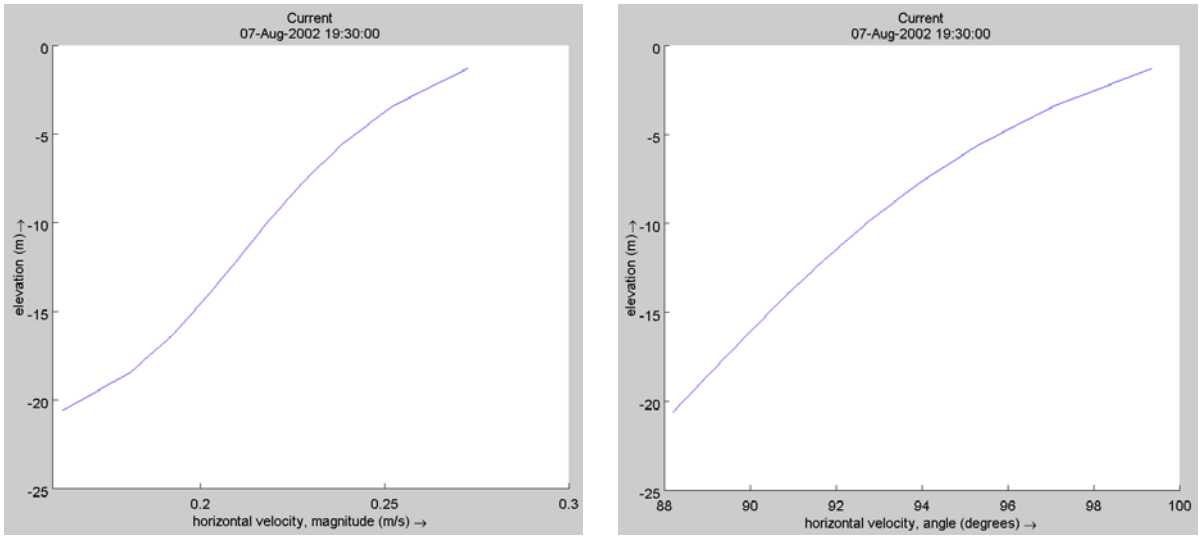


(b)

Figura 115 - Resultado da simulação do Inverno de 2002 – (a) Mapa de correntes Delft3D – (02/08/02 – 19:30 h – Quadratura – Enchente) – (b) Perfil da velocidade no Ponto ADCP-CODESP



(a)



(b)

Figura 116 - Resultado da simulação do Inverno de 2002 – (a) Mapa de correntes Delft3D – (7/08/02 – 19:30 h – Sizígia – Vazante) – (b) Perfil da velocidade no Ponto ADCP-CODESP

Na Figura 117 está apresentado um gráfico de elevação da superfície onde são mostrados os instantes de maré para os mapas de correntes apresentados.

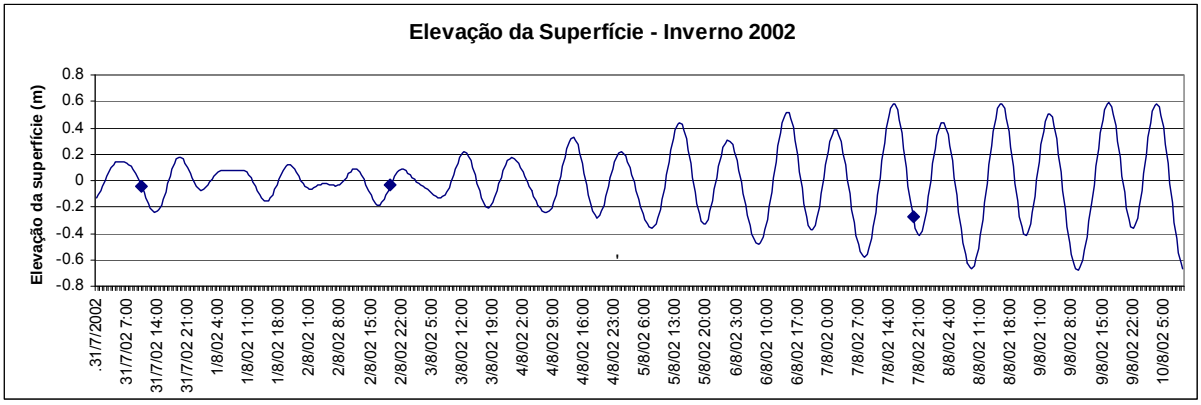
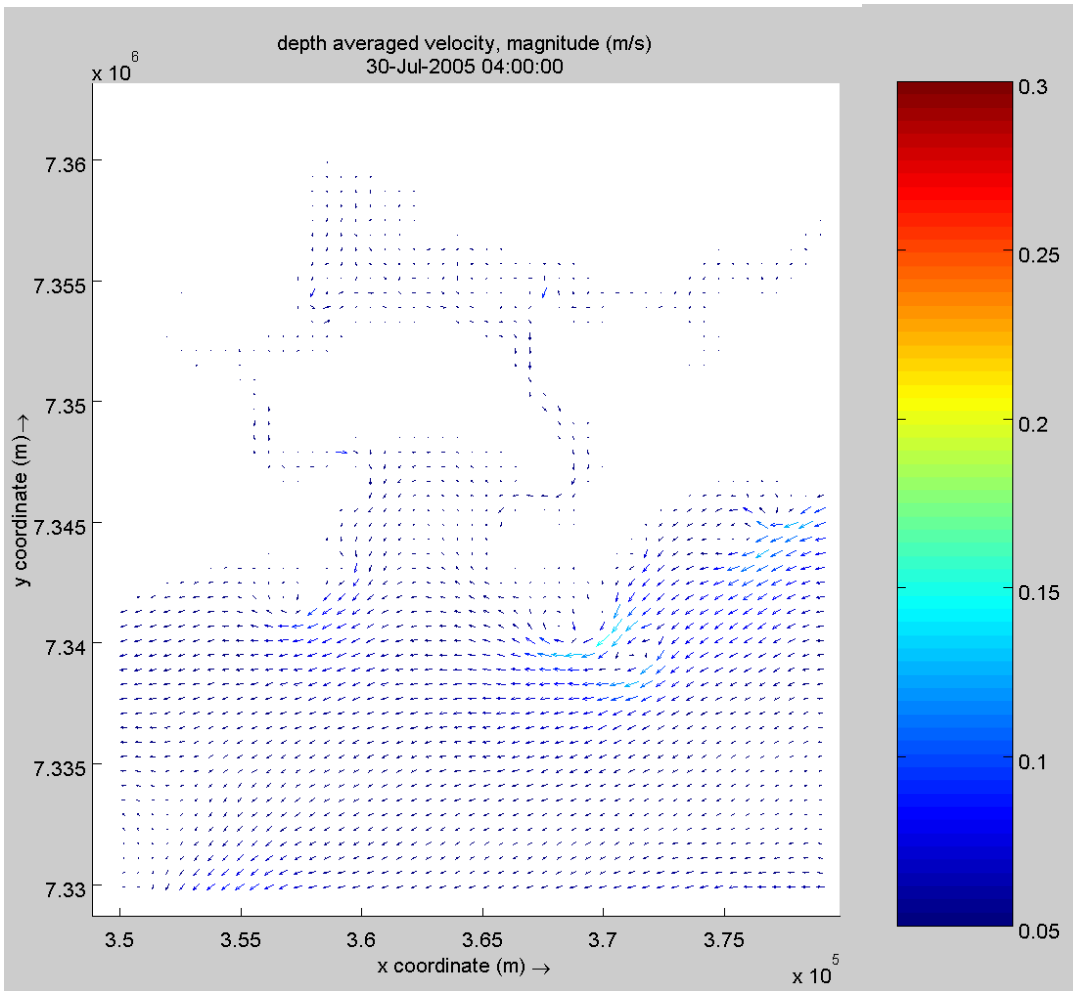
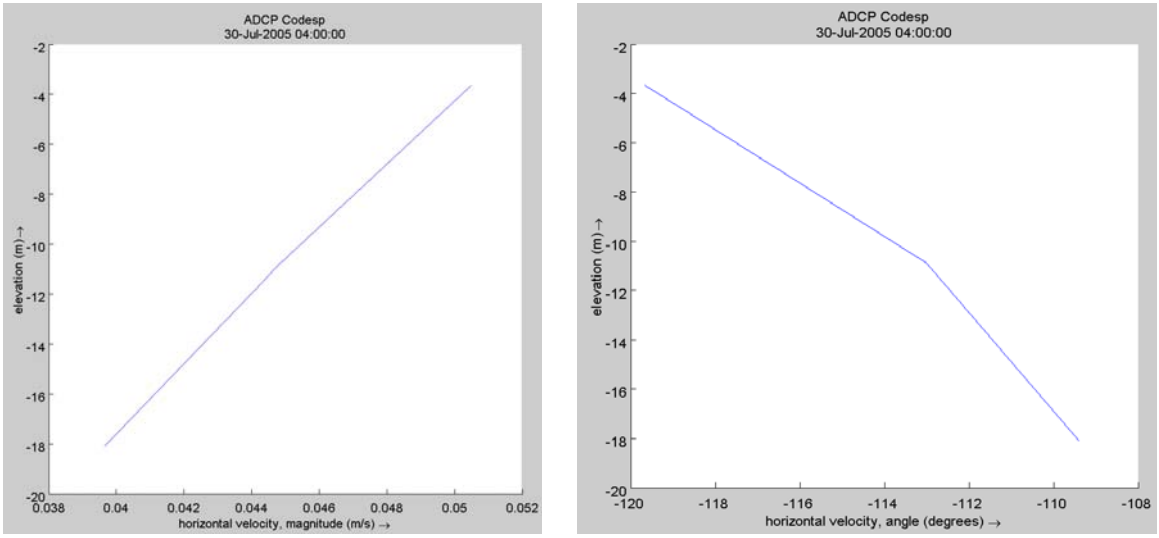


Figura 117 - Gráfico de Elevação da Superfície mostrando os instantes em que foram apresentados os mapas de correntes – Inverno 2002

Para o ponto de medição ADCP-CODESP, nos instantes de 31/07/02 10:30h, 02/08/02 19:30h e 07/08/2002 19:30h, as velocidades (média na profundidade) medidas em campo foram 15 cm/s, 32 cm/s e 21 cm/s, respectivamente. As direções são 256º, 76º e 93º, respectivamente. Pode-se notar concordância destes valores nas intensidades e nas direções apresentadas nas seguintes figuras: Figura 114, Figura 115, Figura 116 respectivamente. O ponto de medição de corrente está localizado na coordenada 3,62 x 10^5 e 7,334 x 10^6 nas figuras (ADCP-CODESP para 2002).

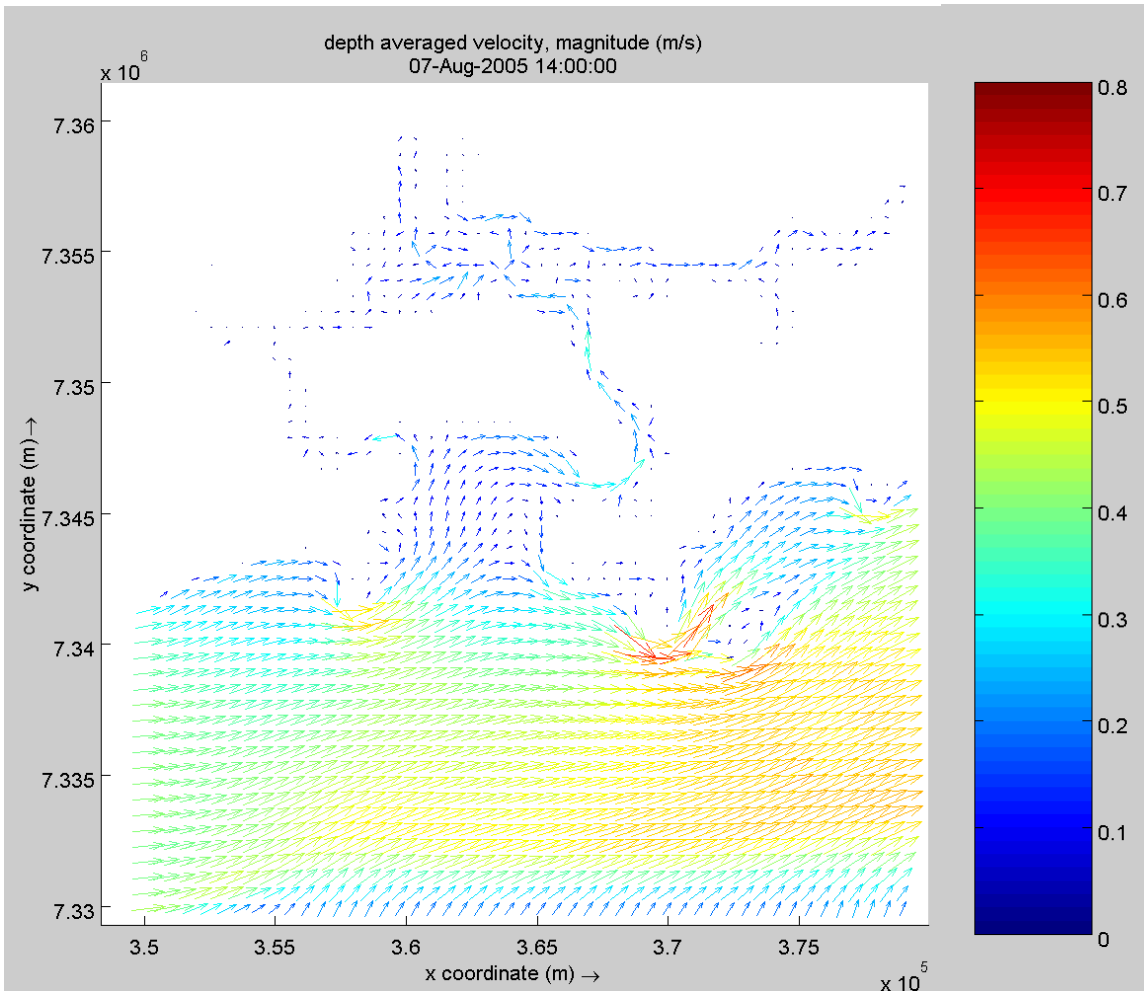


(a)

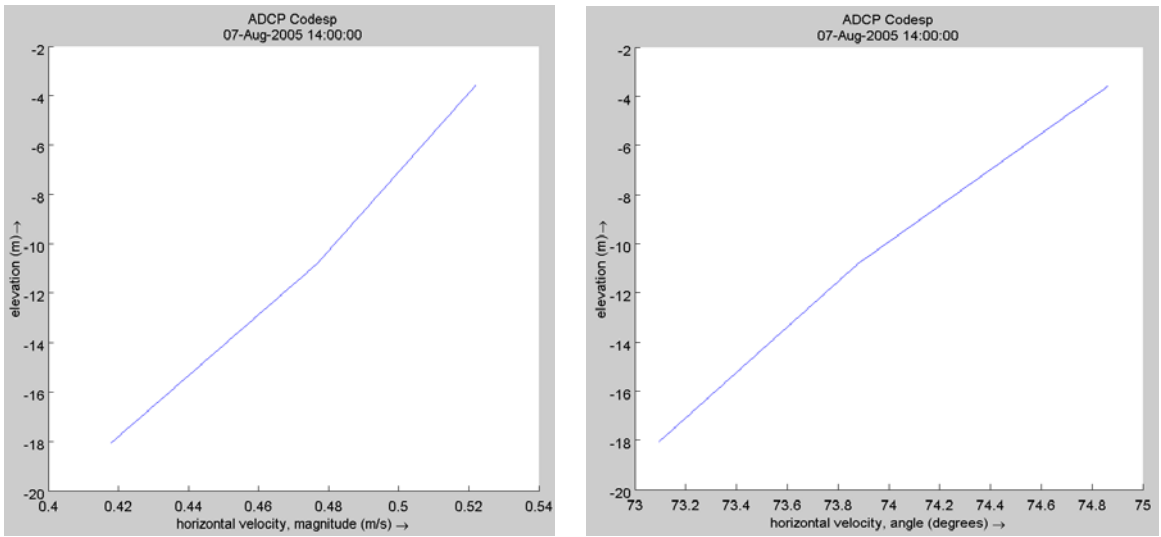


(b)

Figura 118 - Resultado da simulação do Inverno de 2005 – (a) Mapa de correntes – Delft3D (30/07/2005 – 4:00 h – Quadratura - Vazante) – (b) Perfil da velocidade no Ponto ADCP-SABESP

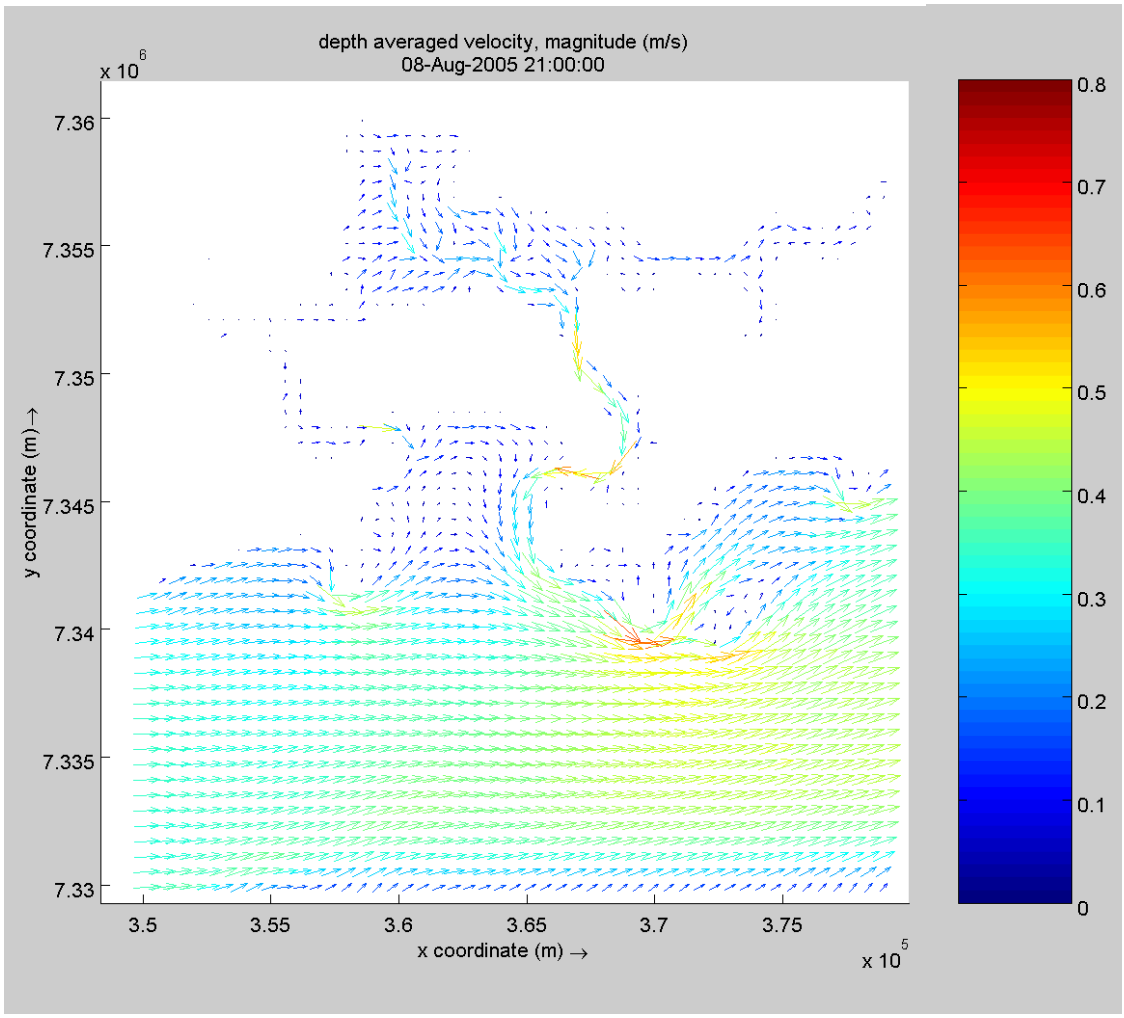


(a)

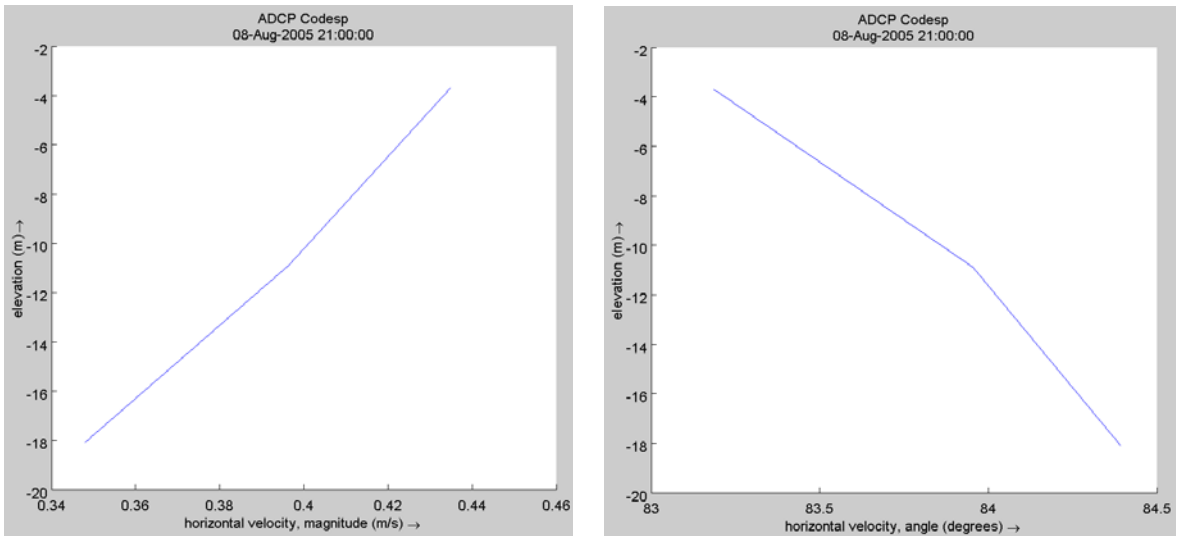


(b)

Figura 119 - Resultado da simulação do Inverno de 2005 – (a) Mapa de correntes Delft3D – (07/08/05 – 14:00 h – Sizígia – Enchente) – (b) Perfil da velocidade no Ponto ADCP-SABESP



(a)



(b)

Figura 120 - Resultado da simulação do Inverno de 2005 – Mapa de correntes Delft3D – (08/08/05 – 21:00 h – Sizígia – Vazante) – (b) Perfil da velocidade no Ponto ADCP-SABESP

Na Figura 121 está apresentado um gráfico de elevação da superfície onde são mostrados os instantes de maré para os mapas de correntes apresentados.

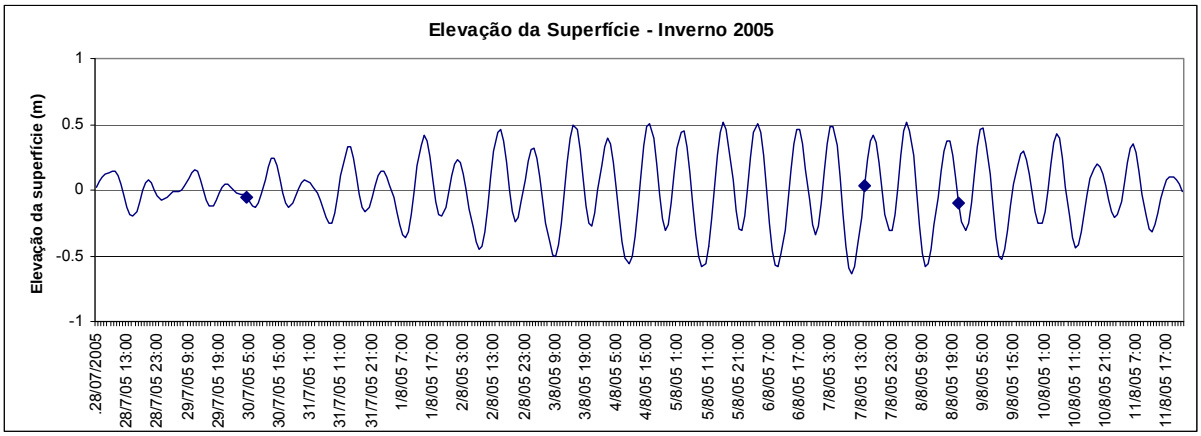


Figura 121 - Gráfico de Elevação da Superfície mostrando os instantes em que foram apresentados os mapas de correntes – Inverno 2005

Para o ponto de medição ADCP-SABESP, os instantes de 30/07/2005 4:00h, 07/08/2005 14:00h e 08/08/05 21:00h, as velocidades medidas em campo (média da profundidade) são 0,10 m/s, 0,36 m/s e 0,31 m/s, respectivamente. As direções são 261º, 95º e 97º, respectivamente. Pode-se notar ajuste destes valores nas intensidades e nas direções apresentadas nas figuras anteriores para os dias 07 e 08 de agosto, no entanto para o dia 30 de julho (quadratura), a velocidade na simulação é menor que a medida em campo. O ponto de medição de corrente está localizado na coordenada 3,54 x 10^5 e 7,34 x 10^6 nas figuras (ADCP-SABESP para 2005). Lembrando que, para os perfis de direção extraídos do Delft3D deve-se somar 360º para as direções menores que zero.

Na Figura 122 é apresentado o gráfico da trajetória extraído do ponto de medição de corrente ADCP-SABESP (gráfico à esquerda) e os gráficos de velocidade da corrente da Componente x (gráfico superior à direita) e Componente y (gráfico inferior à direita) para o período de 24/07/2005 a 15/08/2005. Na seqüência são apresentados mapas de correntes.

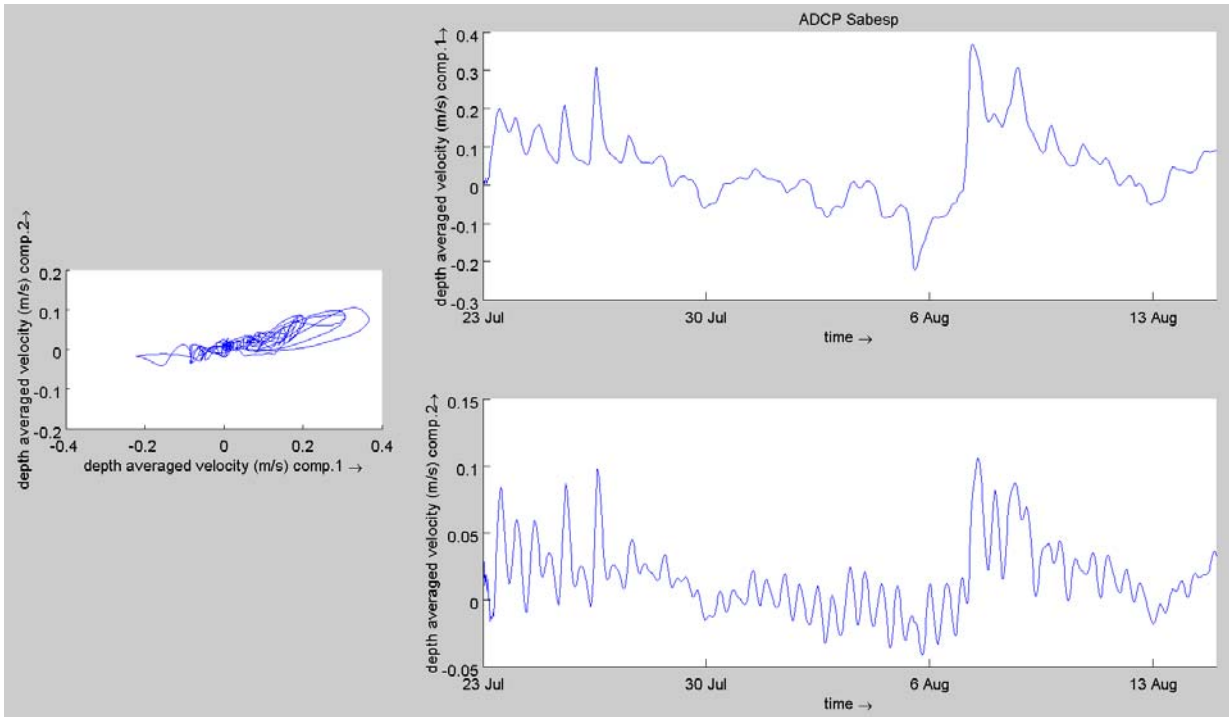


Figura 122 – Trajetória e Velocidade (componente x e y) das correntes no ponto de Medição de Correntes (Ponto ADCP SABESP) – Inverno 2005 – Simulação Delft3D

8.3.4 Correlação dos Resultados

Na Figura 123 apresenta-se gráficos de dispersão dos valores de velocidade das correntes “Componente x” das simulações com o Delft3D versus os valores de observação de campo. Nestes gráficos é traçada a linha de tendência de regressão linear com intersecção em zero. São dados a equação da reta e o R-quadrado, que correspondem valores de coeficiente de correlação de 0,80 para o período de 16/02/2002 a 8/03/2002; 0,60 para o período de 6/08/2002 a 18/08/2002 e 0,67 para o período de 23/07/2005 a 15/08/2005.

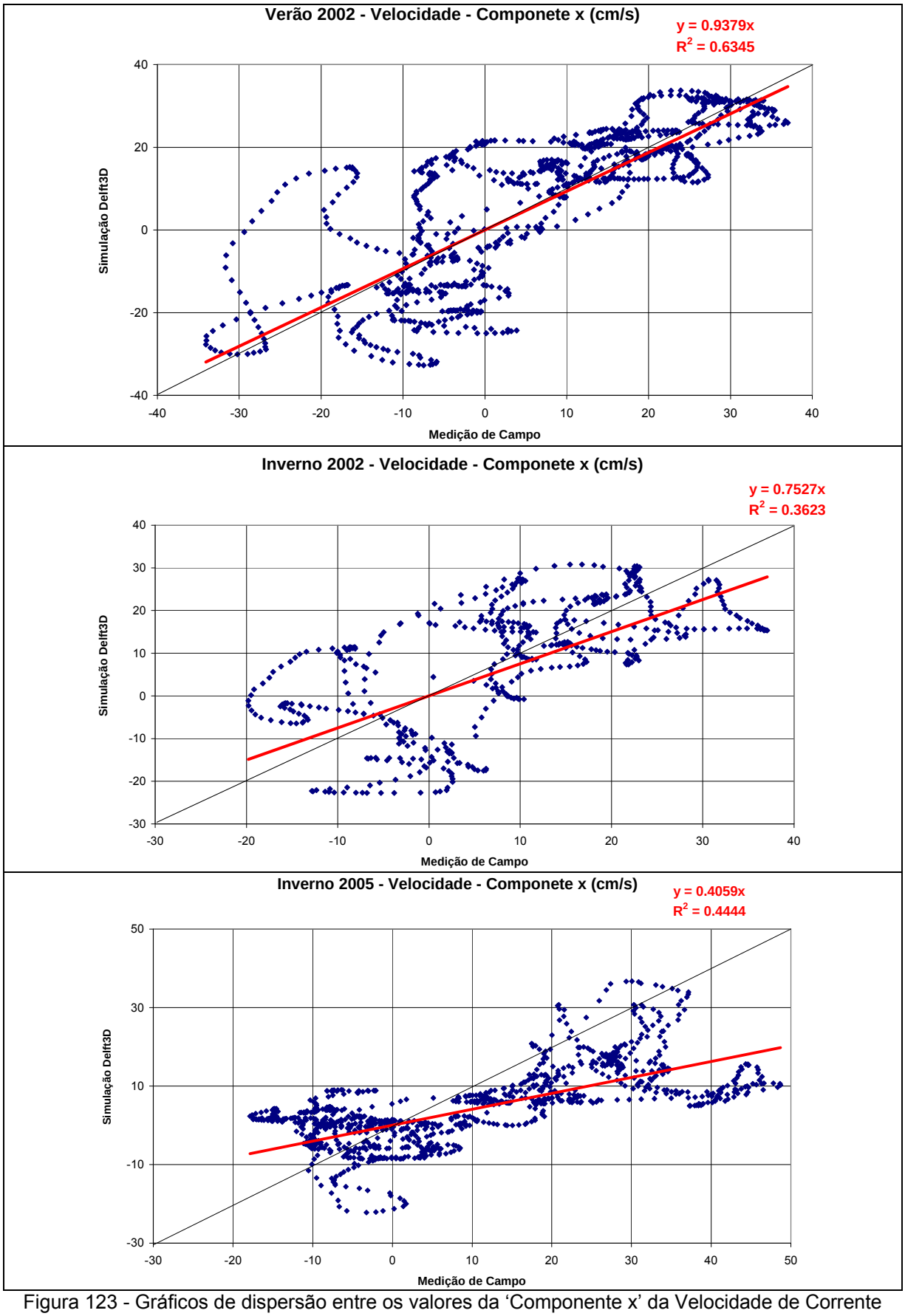


Figura 123 - Gráficos de dispersão entre os valores da 'Componente x' da Velocidade de Corrente entre a Simulação Delft3D e Observações de Campo

8.3.5 Correntes no Ponto de Lançamento do Emissário Submarino de Santos / São Vicente – Delft3D

As séries temporais, extraídas dos resultados de simulações com o Delft3D para as correntes no Ponto de Lançamento do Emissário Submarino de Santos / São Vicente, são apresentadas nas próximas figuras (Figura 124, Figura 125, Figura 126 e Figura 127).

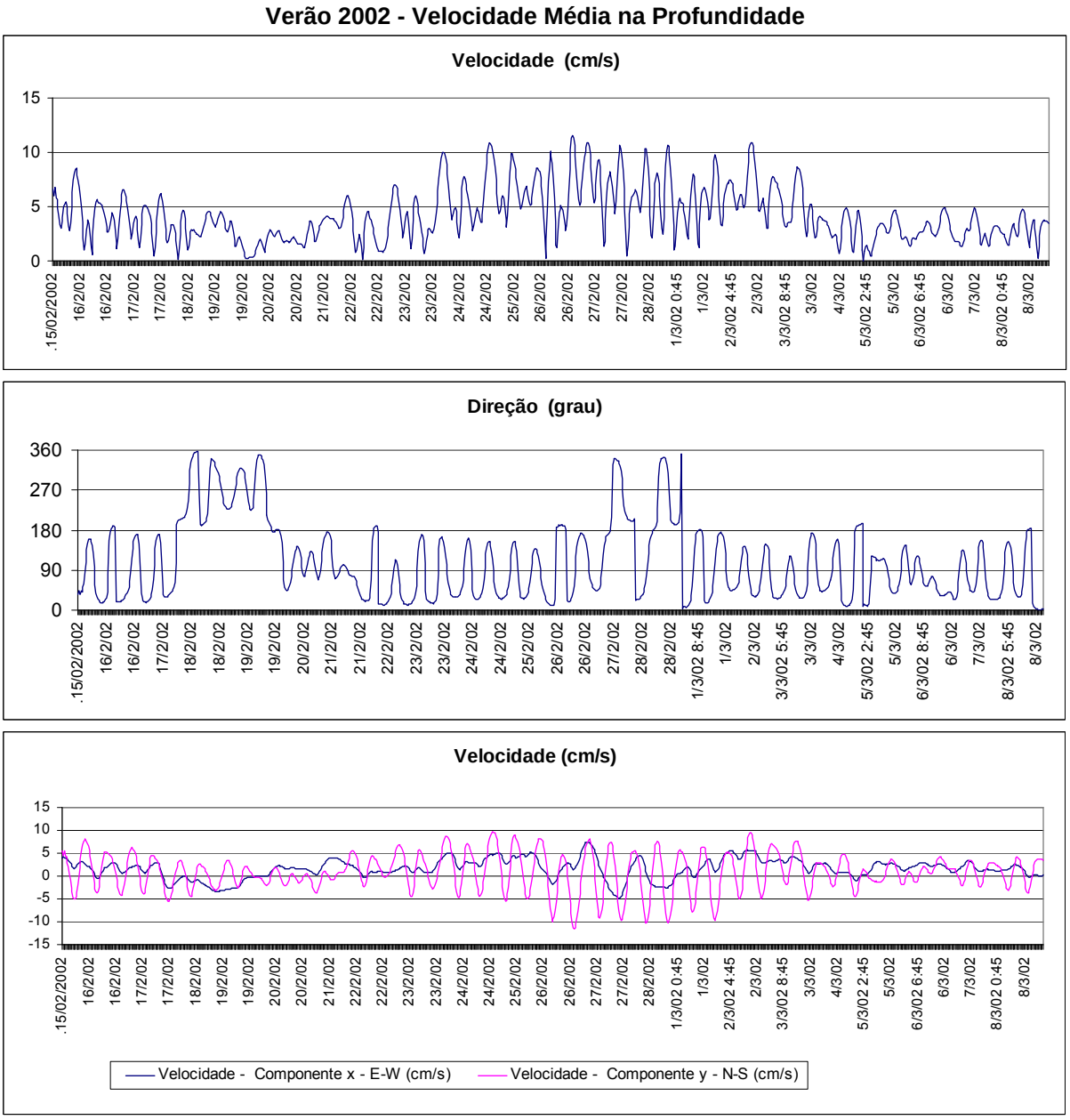


Figura 124 - Velocidades e direção das correntes no Ponto de Lançamento do Emissário Submarino de Santos / São Vicente – Verão 2002 – Simulação Delft3D

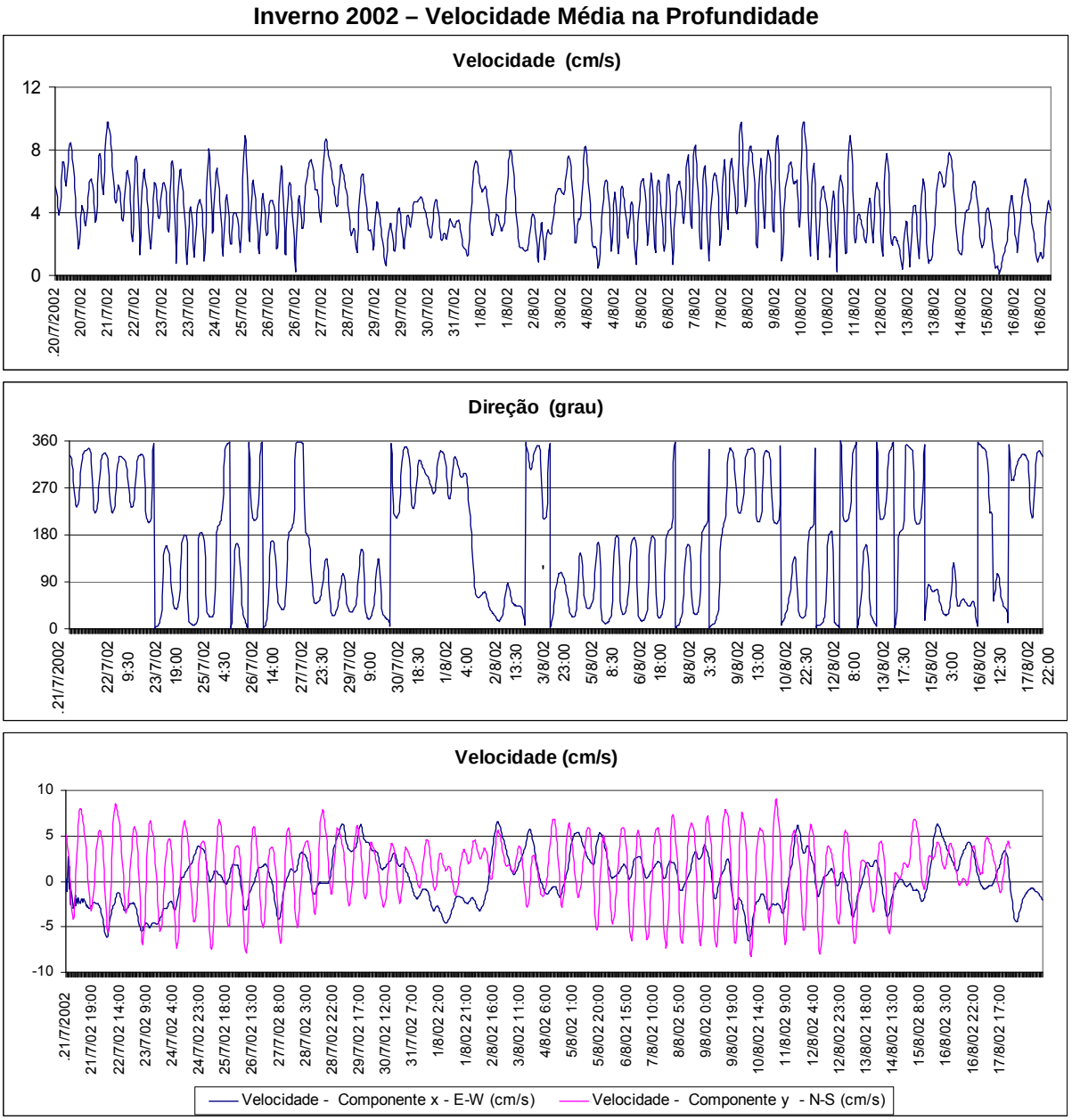


Figura 125 - Velocidades e direção das correntes no Ponto de Lançamento do Emissário Submarino de Santos / São Vicente – Inverno 2002 – Simulação Delft3D

Figura 126 - Velocidades e direção das correntes no Ponto de Lançamento do Emissário Submarino de Santos / São Vicente – Inverno 2002 – Simulação Delft3D – Velocidades na Superfície, ½ Água e Fundo

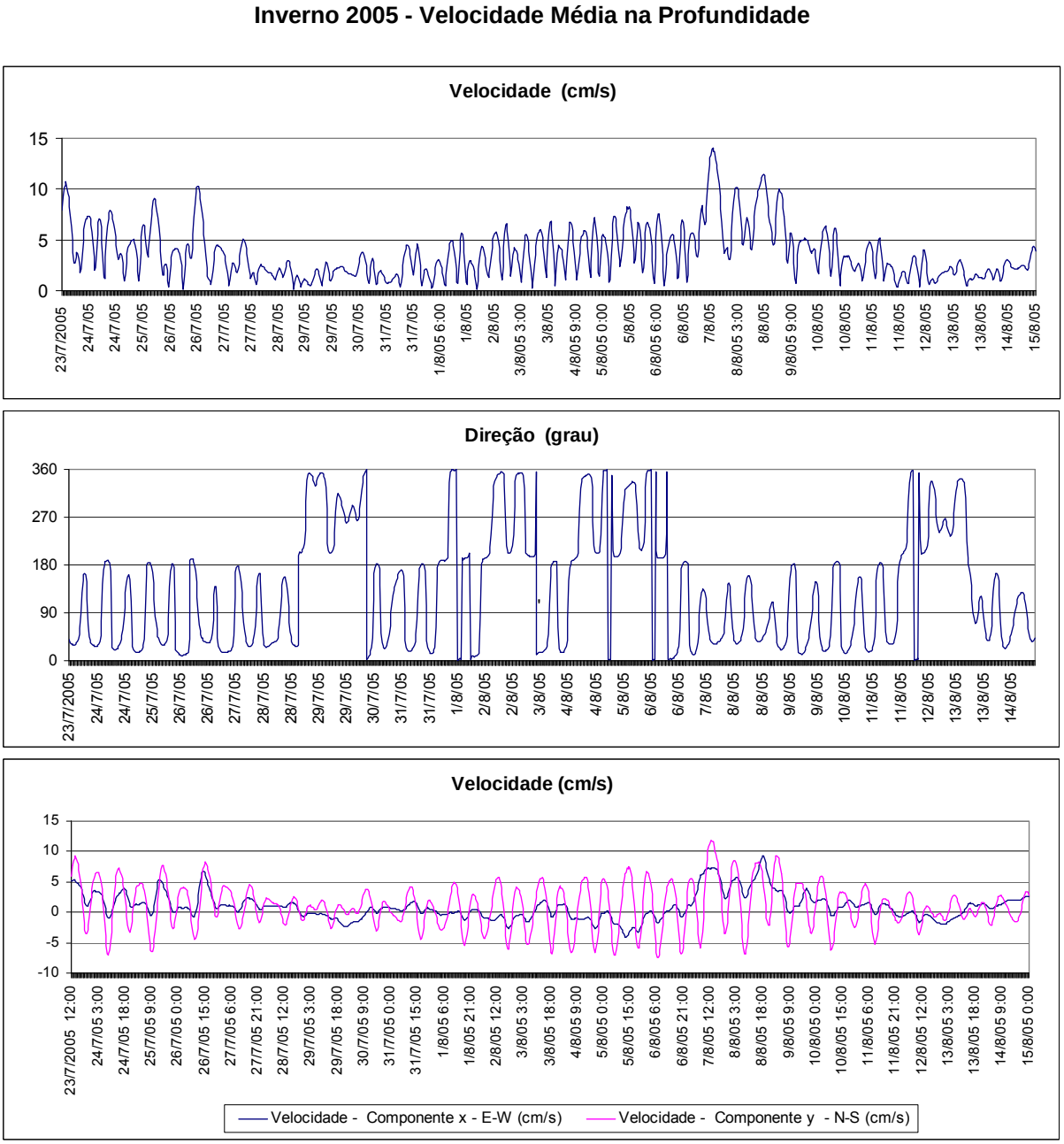
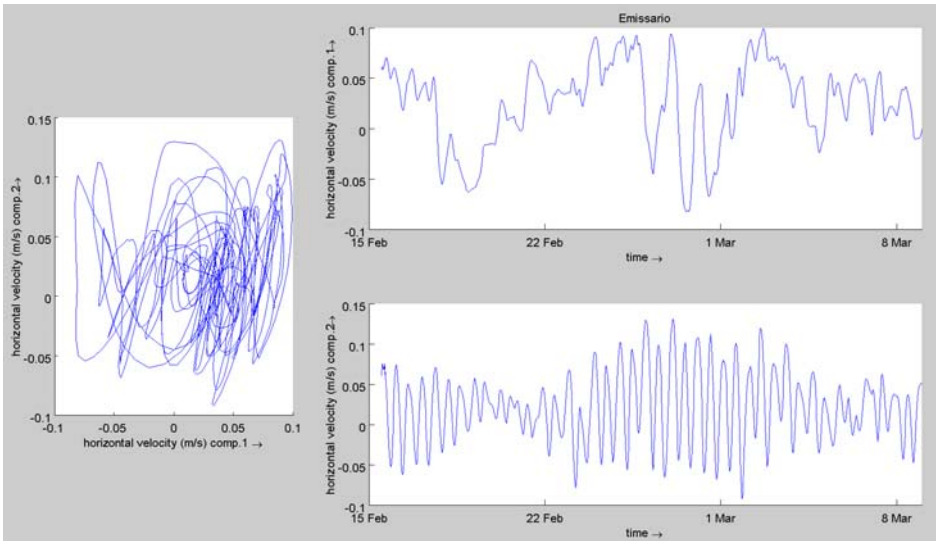
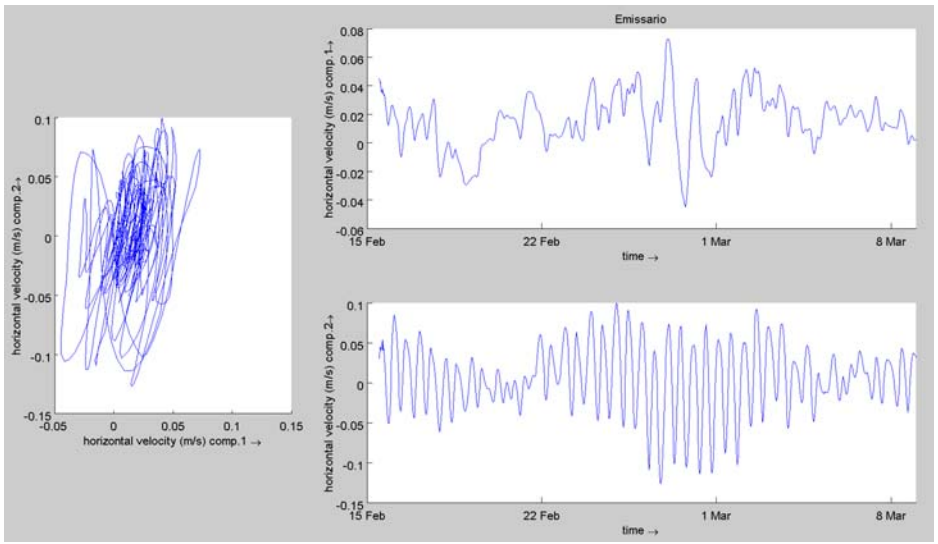


Figura 127 - Velocidades e direção das correntes no ponto de lançamento do emissário submarino de Santos / São Vicente – Inverno 2005 – Simulação Delft3D

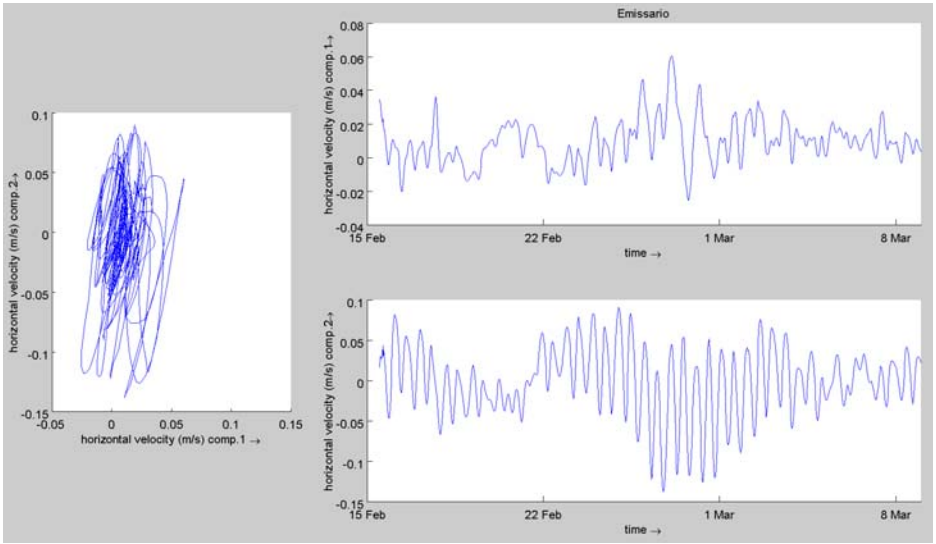
Na Figura 128 é apresentado o gráfico da trajetória extraído do ponto de lançamento do Emissário de Santos / São Vicente (gráfico à esquerda) e os gráficos de velocidade da corrente da “Componente x” (gráfico superior à direita) e “Componente y” (gráfico inferior à direita) para o período de 15/02/2002 a 08/03/2002. São apresentados gráficos de velocidade para a superfície, ½ água e fundo.



(a)



(b)



(c)

Figura 128 - Trajetória e Velocidade (componente x e y) das correntes no ponto de lançamento do emissário submarino de Santos / São Vicente – Verão 2002 – Simulação Delft3D – (a) Superfície, (b) ½ Água e (c) Fundo

8.3.6 Verificação do modelo com a descarga turbinada em Cubatão

Conforme HIDROCONSULT (1974), na circulação das águas do Estuário de Santos existe um fluxo efetivo constituído pelos deflúvios das Bacias Hidrográficas afluentes ao estuário, ao qual são adicionadas as descargas de turbinamento na Usina Hidrelétrica de Henry Borden. Conforme o autor (op. citado) este fluxo efetivo escoa superficialmente através do estuário, em direção à Baía de Santos. Assim, o projeto de Emissário Submarino de Santos / São Vicente foi concebido levando em conta a existência desta corrente superficial de água estuarina que escoa pelo centro da Baía mar afora.

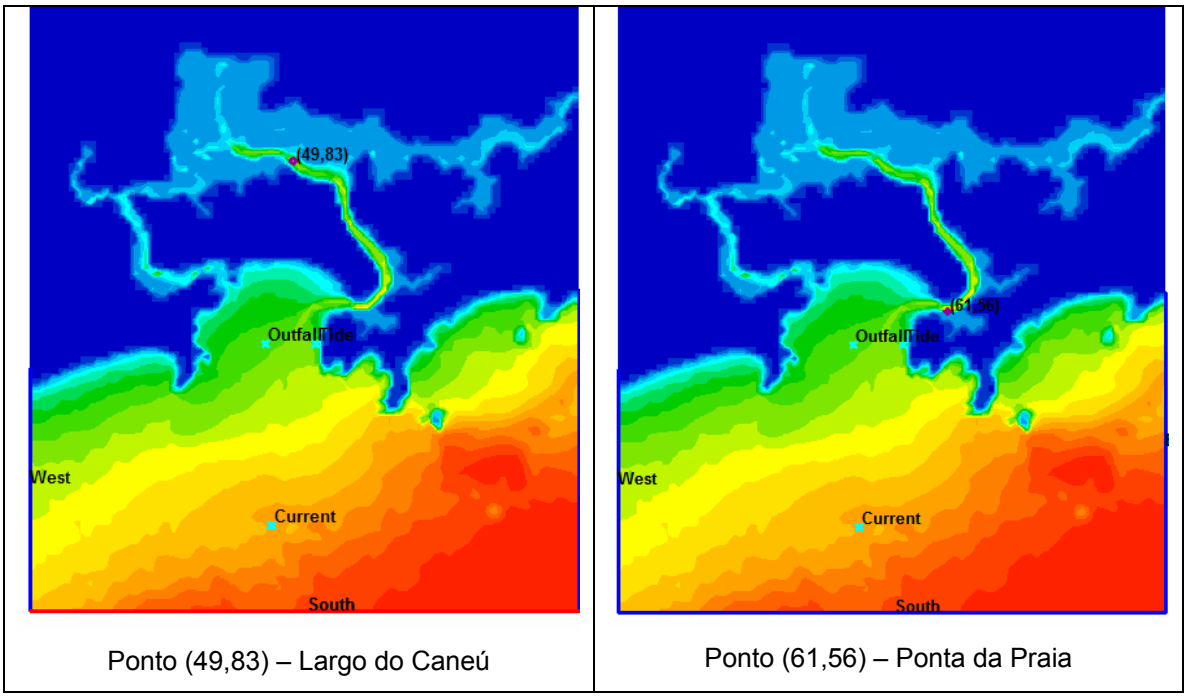
Com base nos estudos hidrológicos da época (1974), verificou-se que o fluxo médio efetivo seria constituído pelos deflúvios naturais e pelas descargas turbinadas, nas seguintes proporções:

Tabela 14 – Vazão de Fluxo Efetivo afluente à Baía de Santos (HIDROCONSULT, 1974)

Vazão	Vazão de Fluxo Efetivo (m^3/s)	Vazão de Deflúvios Naturais (m^3/s)	Vazão de descarga Turbinada (m^3/s)
Média anual	110	20	90
Mês mais chuvoso	120	30	90
Mês mais seco	100	10	90

Cabe lembrar, que atualmente esta descarga turbinada não ocorre no valor de 90 m^3/s. A partir de 6/11/1992 estão desautorizados os bombeamentos para fins de geração de hidrelétrica na Usina de Henry Borden, conforme a Resolução conjunta da Secretaria de Meio Ambiente e da Secretaria de Energia e Saneamento do Estado de São Paulo. Assim, a disponibilidade hídrica para a geração hidrelétrica varia atualmente entre 15 a 20 m^3/s (média). Conforme a Resolução n.º 453 - ANEL (Brasil, 1998), a energia assegurada da Usina Henry Borden é de 108 $MW_{médio}$, o que corresponde a uma vazão média turbinada da ordem de 19,2 m^3/s.

Com caráter especulativo, foram realizados testes procurando simular a condição de vazão média anual de fluxo efetivo (110 m^3/s), escoando através do estuário. Considerou-se a contribuição a partir de descargas turbinadas em Cubatão no estuário santista, nos seguintes pontos:



Ponto (49,83) – Largo do Caneú | Ponto (61,56) – Ponta da Praia

Figura 129 - Localização dos pontos para teste da descarga turbinada em Cubatão

Foram considerados os seguintes cenários para as simulações:

- Cenário 1 – Cenário utilizado na simulação do período de inverno de 2002 (com maré e vento, sem a vazão turbinada em Cubatão).
- Cenário 2 - Considerado os mesmos parâmetros do Cenário 1, acrescido da situação com a vazão turbinada em Cubatão com descarga no Ponto (49,83) (com maré e vento, com vazão turbinada em Cubatão).
- Cenário 3 - Considerado os mesmos parâmetros do Cenário 1, acrescido da situação com a vazão turbinada em Cubatão com descarga no Ponto (61,56) (com maré e vento, com vazão turbinada em Cubatão).
- Cenário 4 - Considerando o Cenário 1, com exceção do vento (com maré, sem vento e sem a vazão turbinada em Cubatão).
- Cenário 5 - Considerado os mesmos parâmetros do Cenário 4, acrescido da situação com a vazão turbinada em Cubatão com descarga no Ponto (49,83) (com maré, sem vento e com vazão turbinada em Cubatão).

Para ambos os pontos de descarga simulados, a descarga foi considerada na superfície (camada 1), sendo o tipo de descarga Normal (opção do Delft3D no qual a descarga é lançada sem levar em consideração aspectos específicos, ou seja não

são indicadas a direção do fluxo e nem a velocidade do fluxo). A seguir são apresentados os parâmetros utilizados:

Tabela 15 – Parâmetro adotados nas simulações considerando a vazão turbinada em Cubatão

Parâmetro	Valor Adotado
Período da Simulação	20/07/2002 a 30/07/2002
Número de Camadas	10
Salinidade	33,8
Temperatura	21,6º
Vazão de Descarga	110 m^3/s
Salinidade do Fluxo de Descarga	15
Temperatura do Fluxo de Descarga	18º

Os resultados das simulações, extraídos no Ponto de Lançamento do Emissário Submarino de Santos / São Vicente, estão apresentados no gráfico a seguir.

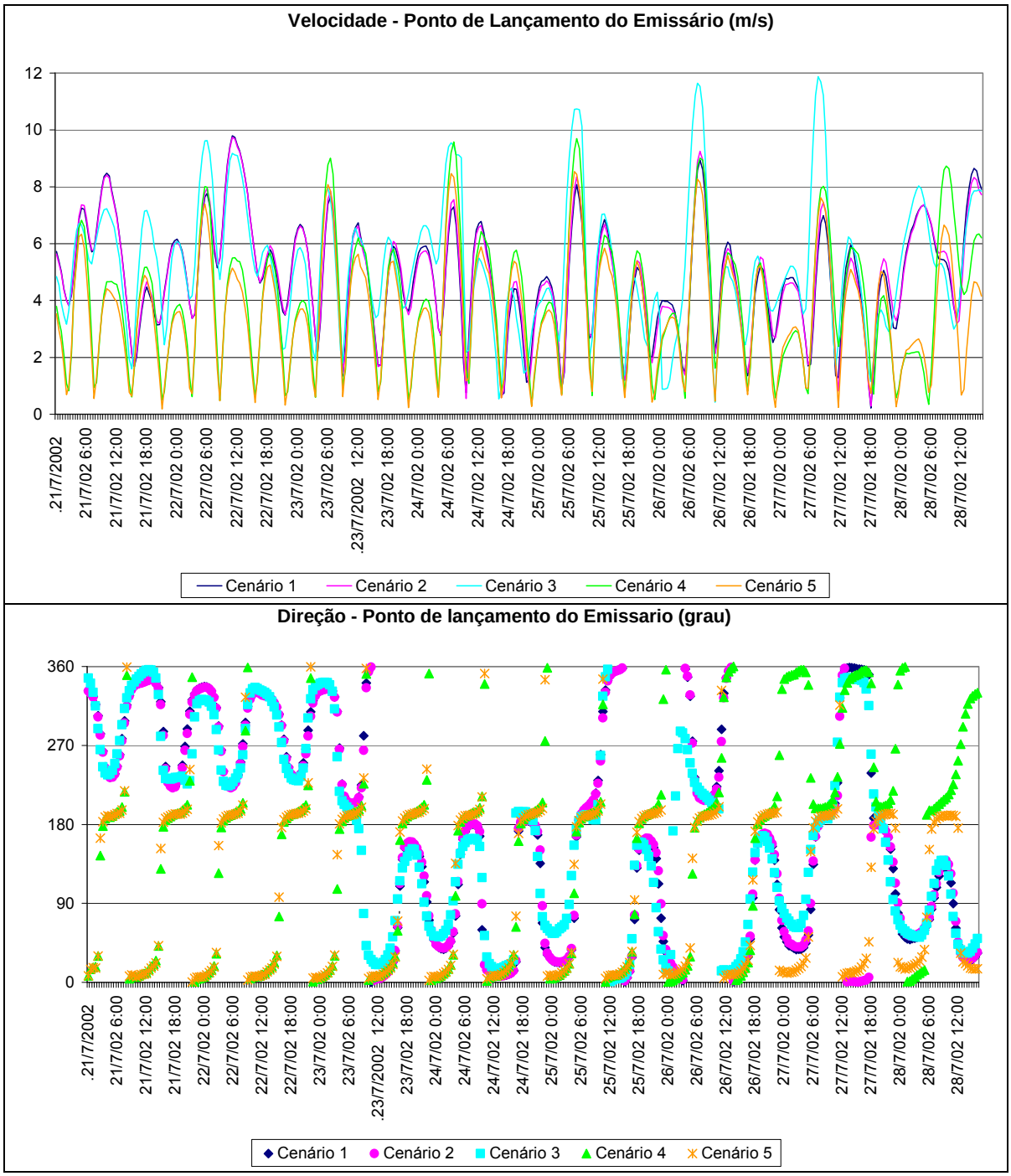
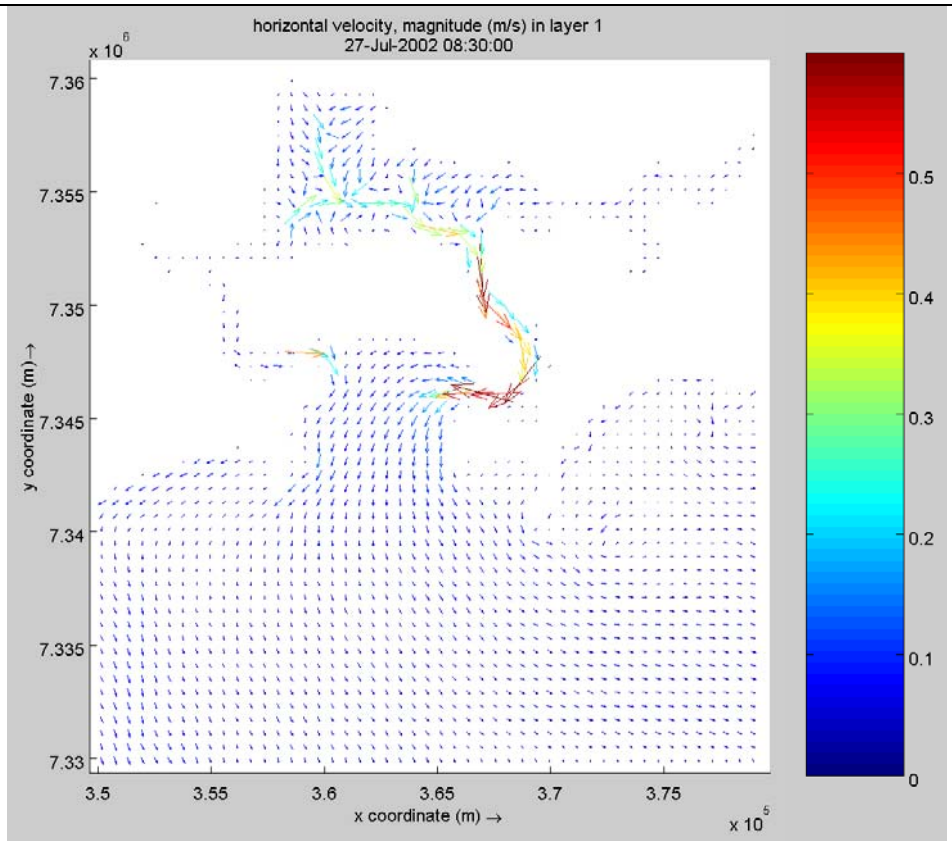
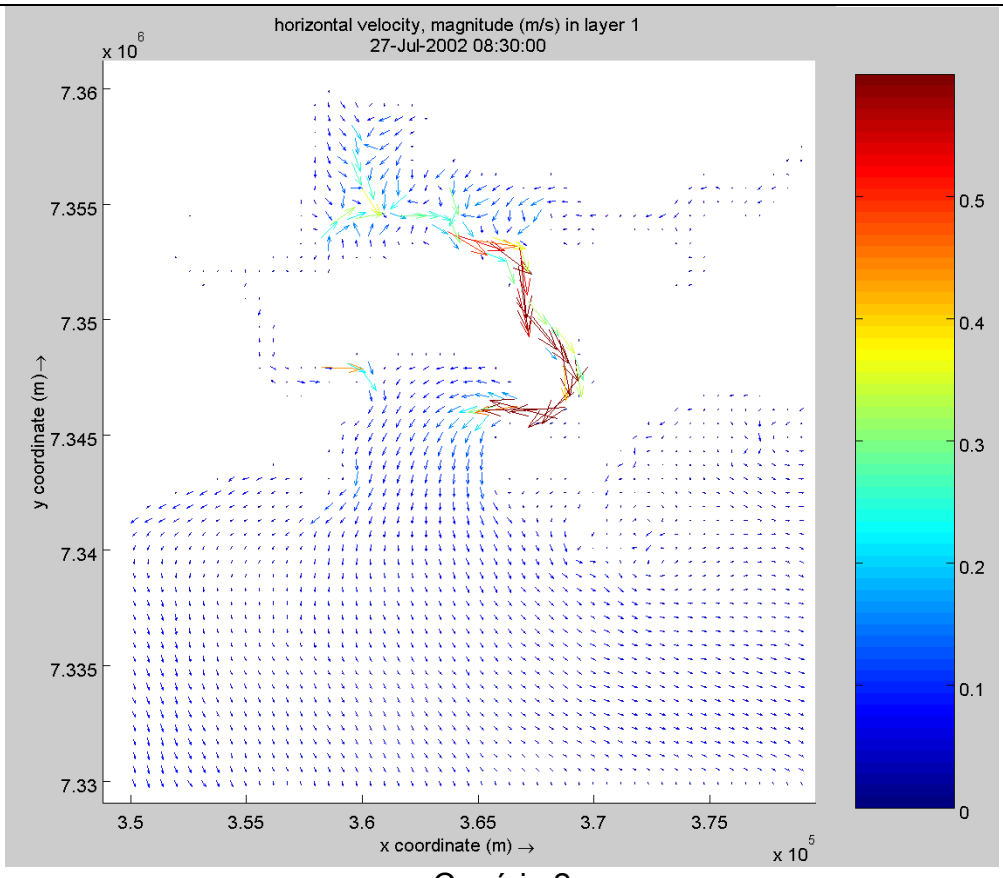


Figura 130 – Velocidade e direção das correntes no Ponto de Lançamento do Emissário Submarino de Santos / São Vicente considerando a vazão turbinada em Cubatão

Para a visualização espacial, são apresentados mapas de correntes no dia 27/7/2002 8:30h. Neste instante a velocidade no ponto de lançamento do emissário foi maior com a descarga turbinada em Cubatão, no entanto o acréscimo foi pouco significativo para a descarga localizada no Largo do Caneú e mais significativa para a descarga localizada na Ponta da Praia. Quanto às simulações sem vento, as duas têm praticamente o mesmo padrão.



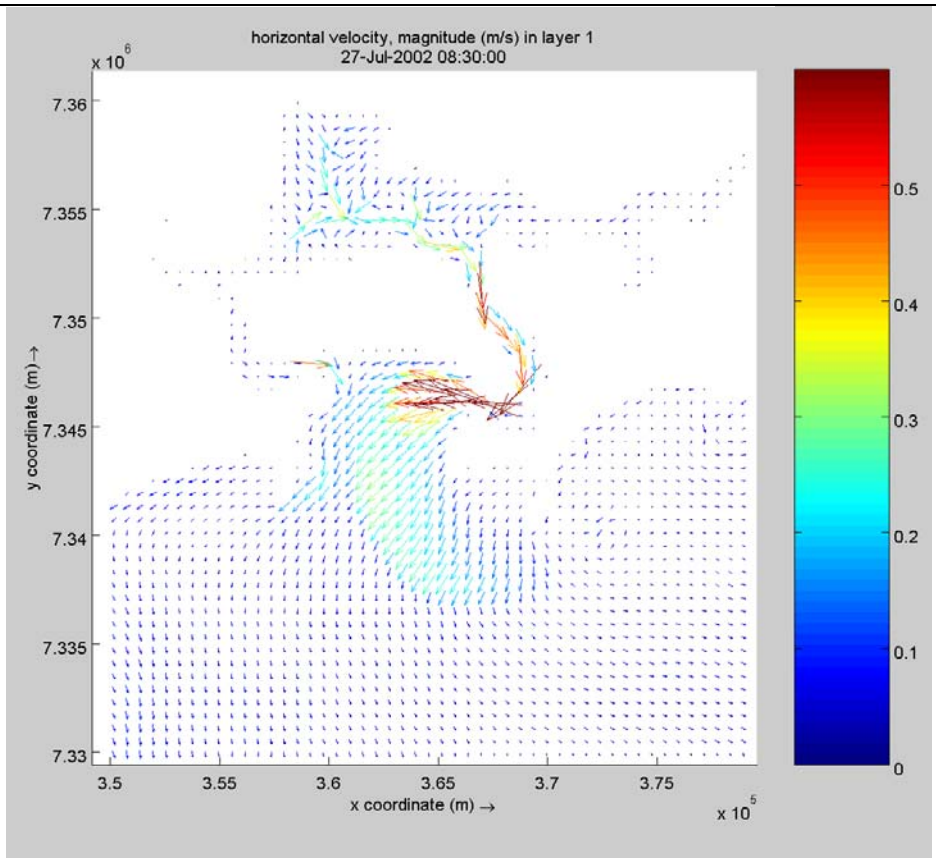
Cenário 1



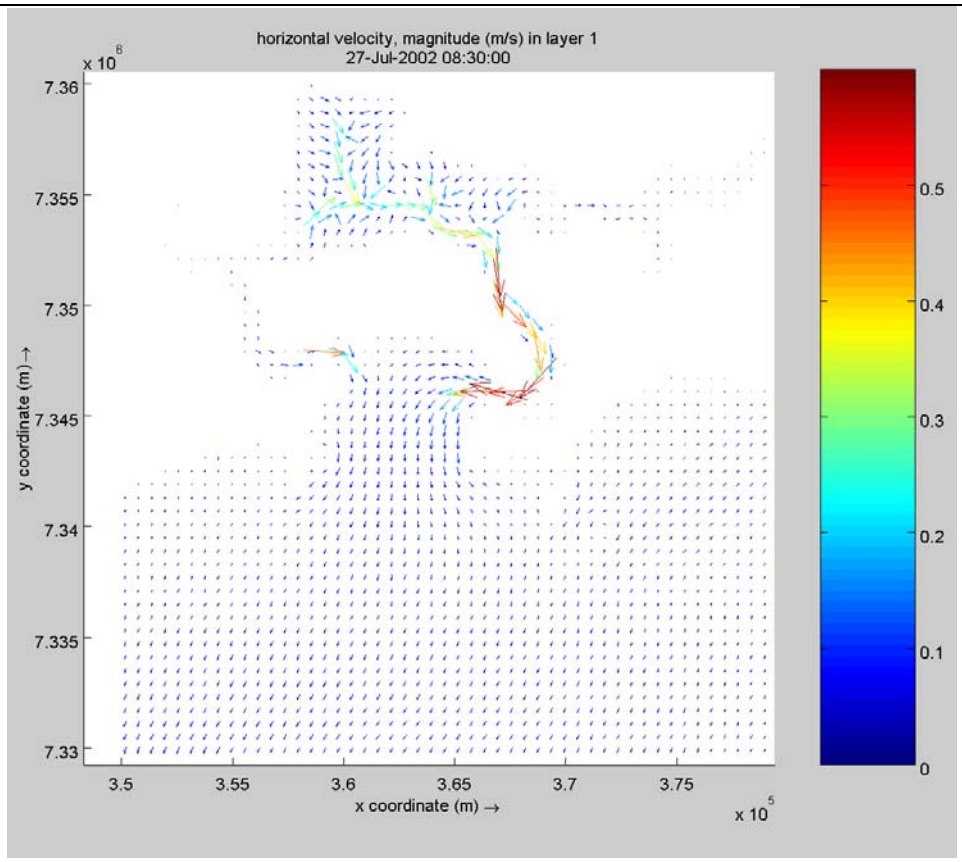
Cenário 2

continua

continuação



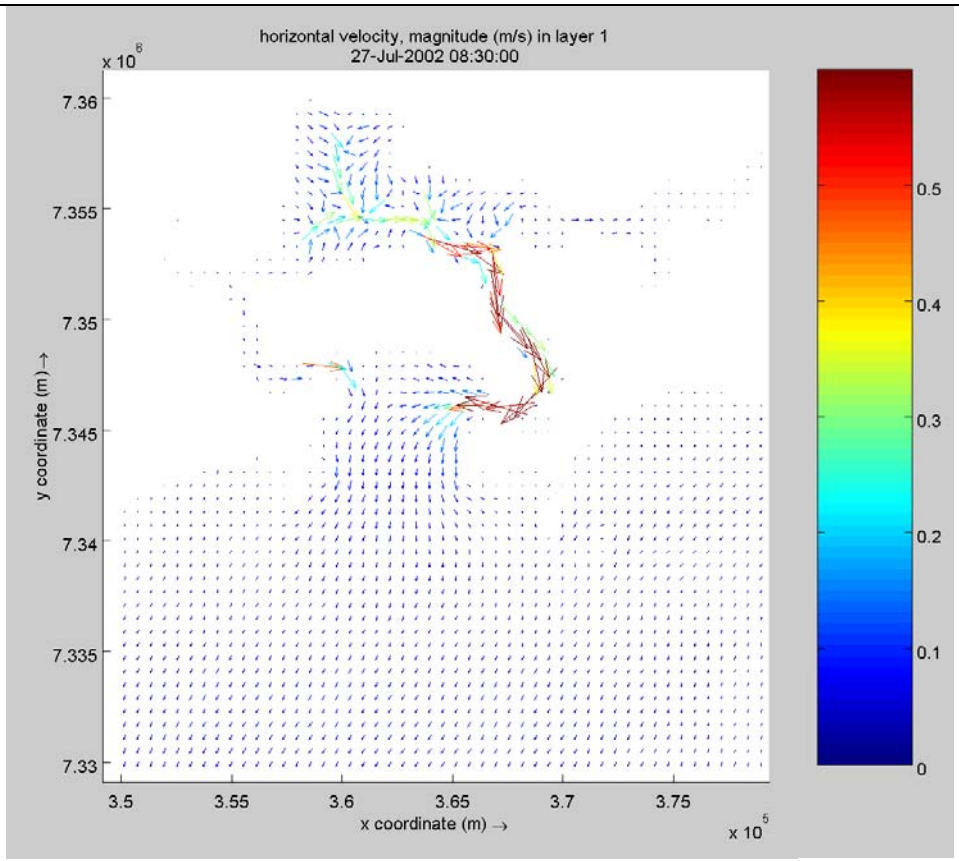
Cenário 3



Cenário 4

continua

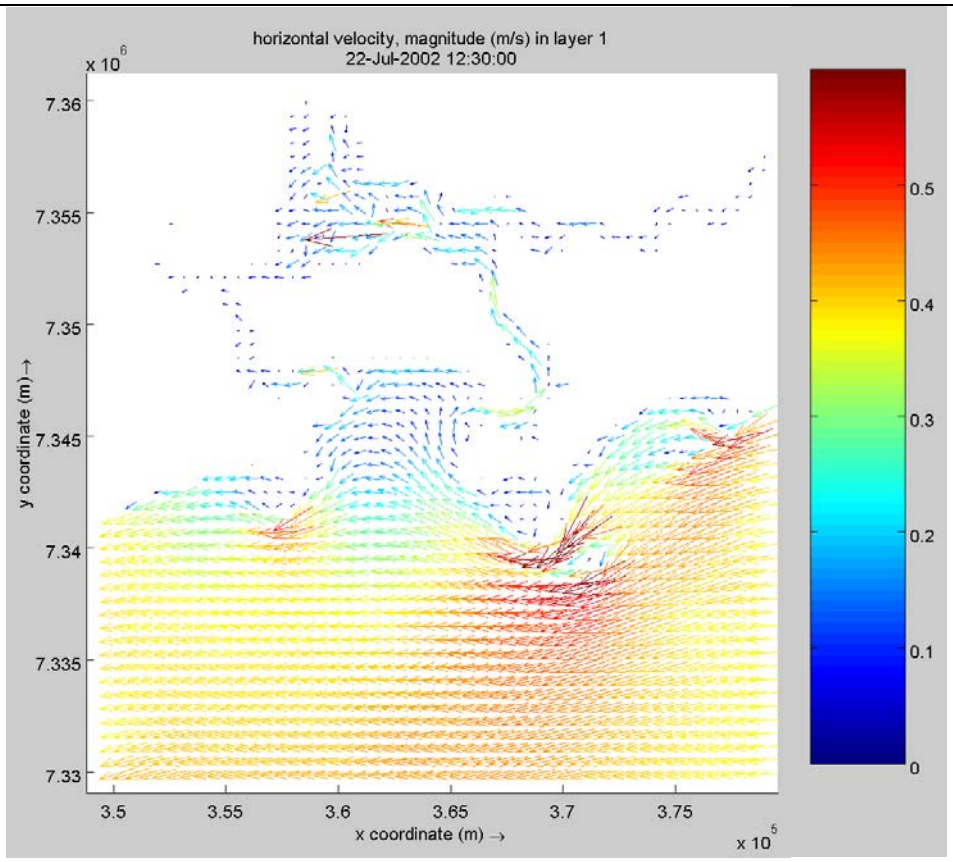
continuação



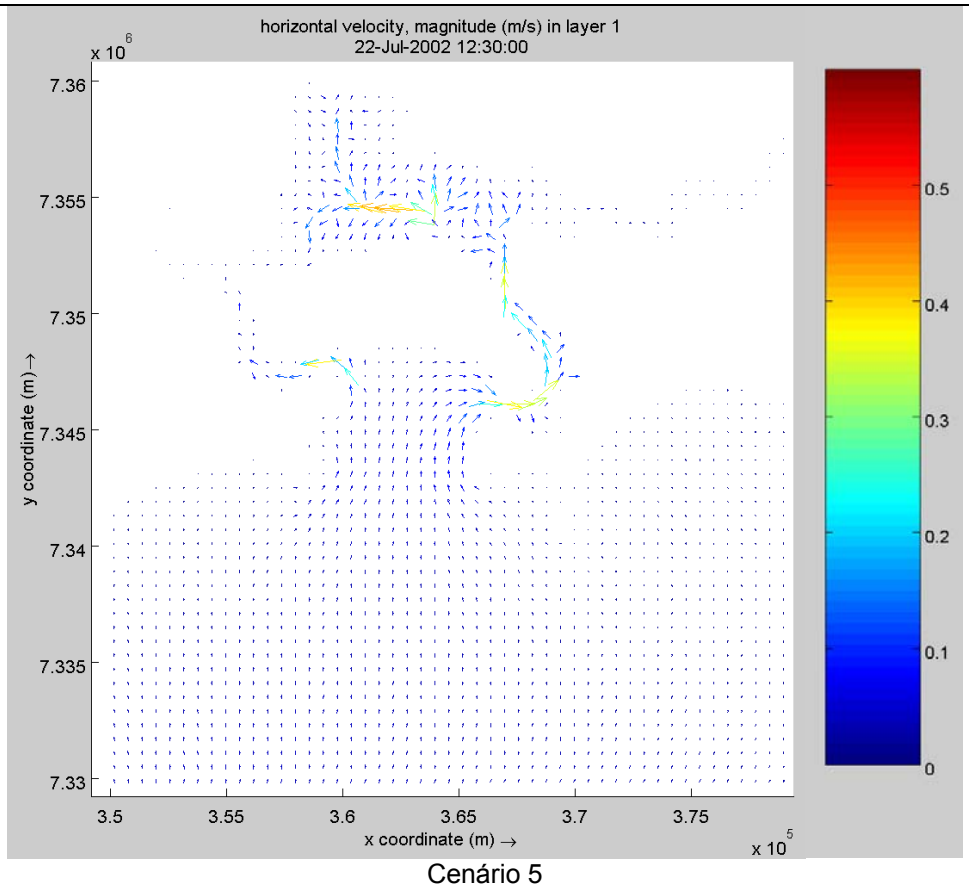
Cenário 5

Figura 131 – Resultados das simulações considerando a vazão turbinada em Cubatão - Mapas de correntes (Delft3D) – 5 Cenários

Entendeu-se que, por representar melhor a descarga de água doce do Cubatão, o ponto mais apropriado para as simulações está no Largo do Caneú e não na Ponta da Praia. Para um instante de vento mais significante, são apresentados mapas de correntes de enchente e vazante para a situação com vazão turbinada em Cubatão e vento, e para a situação com vazão turbinada e sem vento.

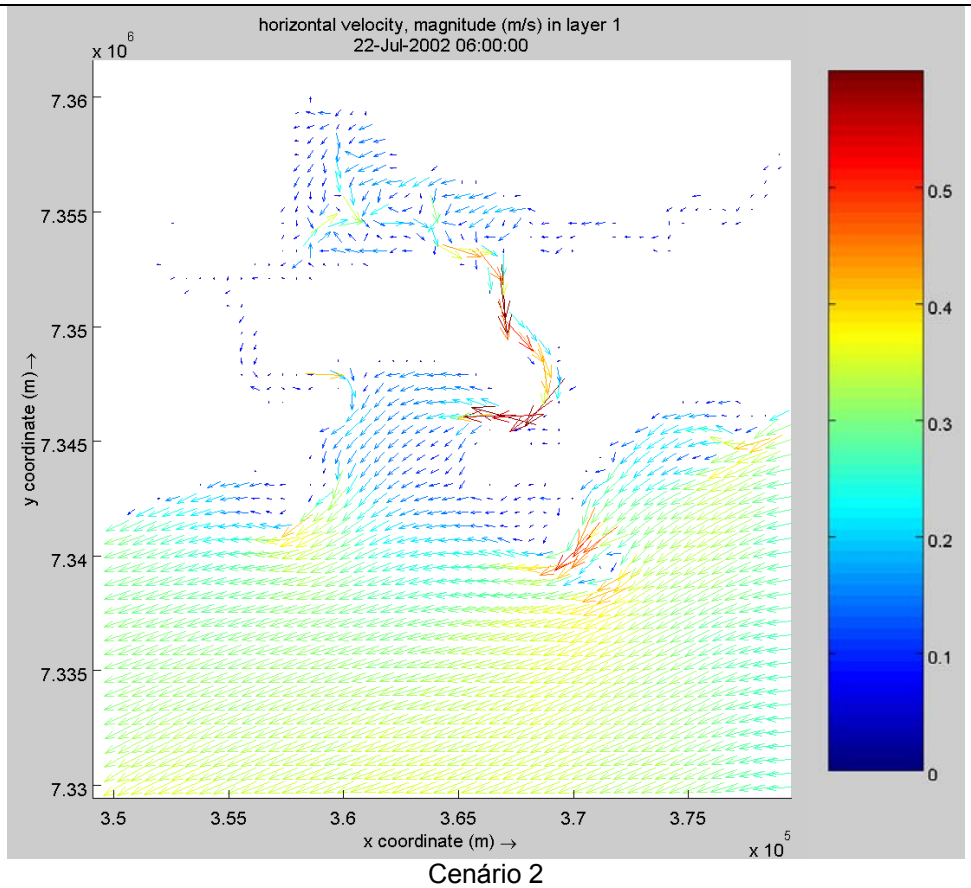


Cenário 2

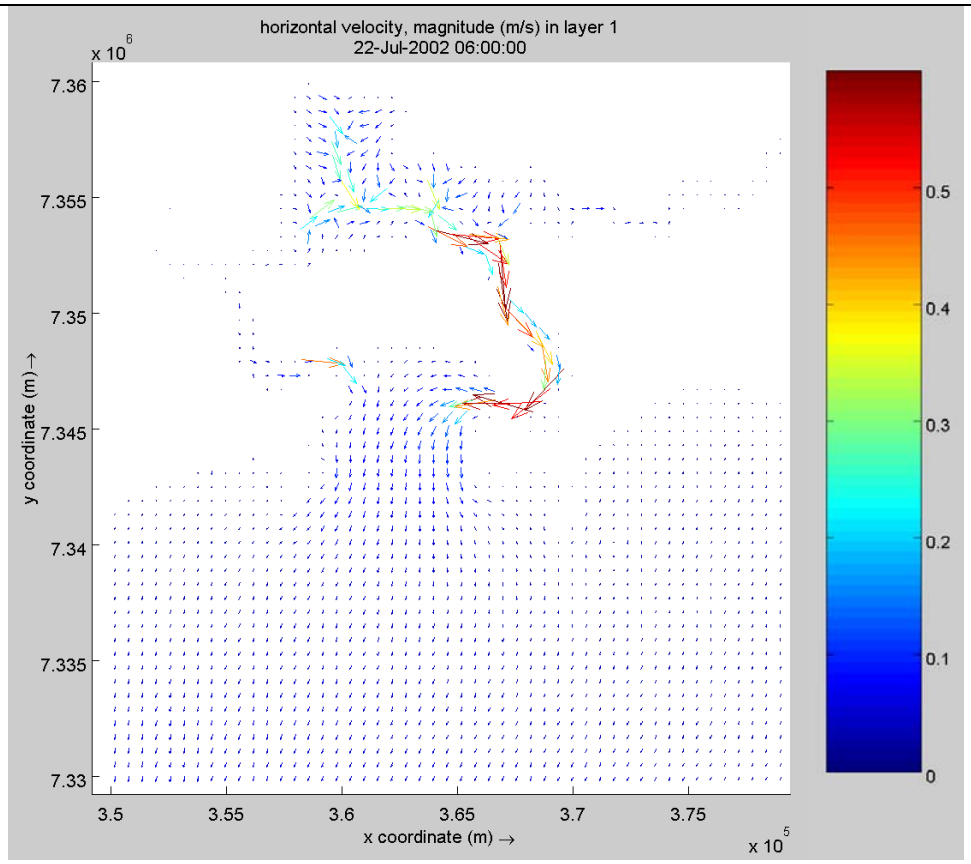


Cenário 5

Figura 132 - Resultados das simulações considerando a vazão turbinada em Cubatão - Mapas de correntes (Delft3D) – Cenário 2 e Cenário 5 – Com e Sem Vento - Enchente



Cenário 2



Cenário 5

Figura 133 - Resultados das simulações considerando a vazão turbinada em Cubatão - Mapas de correntes (Delft3D) – Cenário 2 e Cenário 5 – Com e Sem Vento - Vazante

8.4 Comparação direta entre os Três Modelos

A comparação direta entre os resultados obtidos nas simulações com os três modelos (MIKE 21, POM e Delft3D) e as medições de campo está apresentada na Figura 134 . Esta comparação é feita para a velocidade média na profundidade para o período de Verão de 2002. Este foi o período com maior correlação nos três modelos.

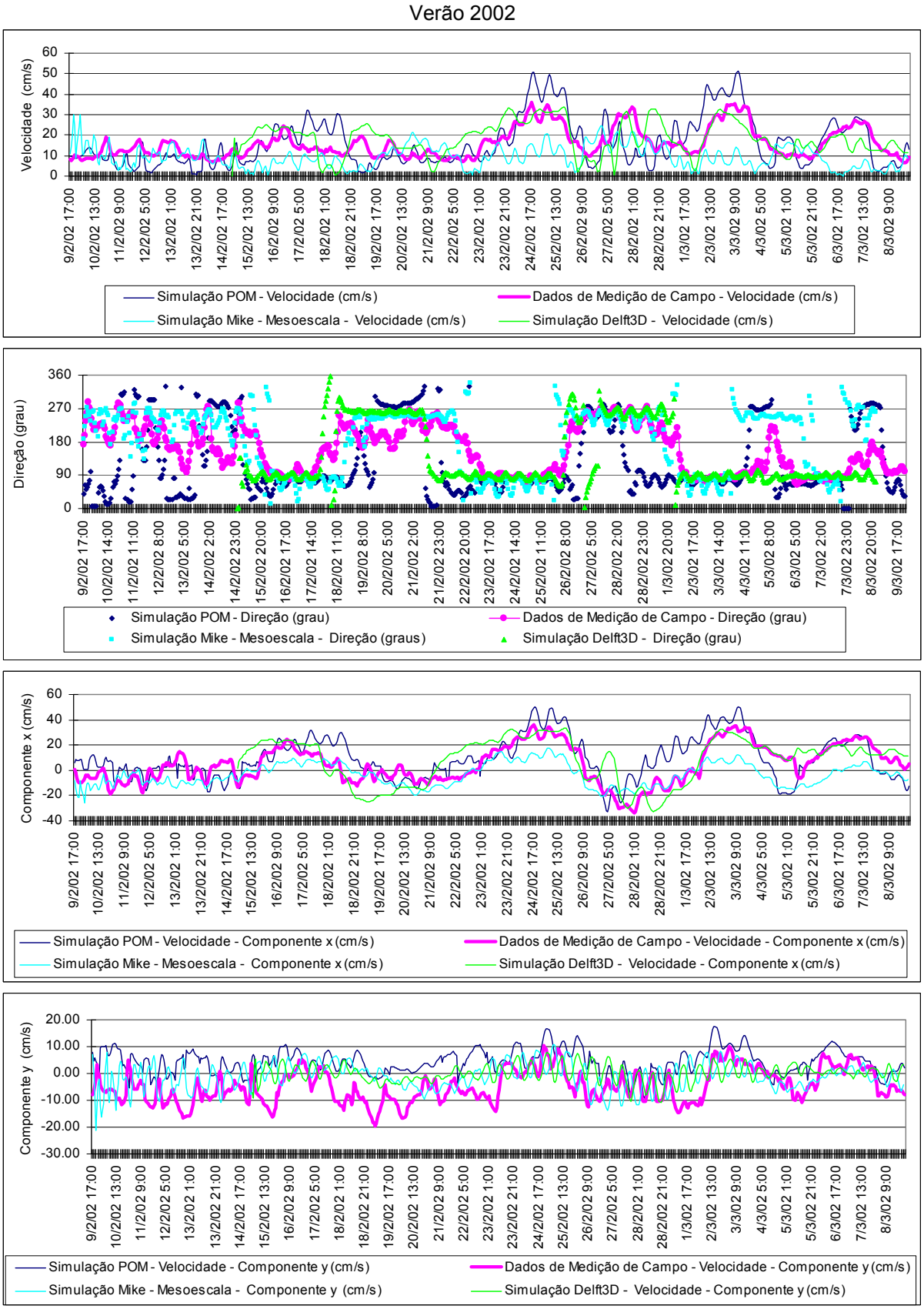


Figura 134 – Comparação entre os dados de corrente medidos em campo e resultados das simulações com o POM, MIKE 21 e Delft3D – Verão 2002 – Velocidade Média na Profundidade – Ponto ADCP-CODESP

8.5 Simulações com o CORMIX

8.5.1 Cenários de Simulação

Os cenários de simulação foram estabelecidos, como já apresentado no capítulo da Metodologia, em função de: avaliação das velocidades de correntes obtidas das medições de campo e dos resultados das simulações com os modelos hidrodinâmcos, da configuração do trecho difusor e do perfil de densidade.

Conforme SABESP (2005a, 2005b, 2006), que apresentam a avaliação da dispersão da pluma do emissário de Santos / São Vicente, para a avaliação do campo próximo é usado o programa especialista CORMIX; e que, para a região da baía de Santos, estes trabalhos utilizam velocidades mínimas em torno de 12 e 15 cm/s e velocidades máximas em torno de 35 e 40 cm/s.

Nesta Tese, foram avaliadas as velocidades de corrente das medições de campo no ponto de lançamento do emissário de Santos, para períodos de treze horas consecutivas (Tabela 8 e Figura 41 – Capítulo 7). São apresentadas na tabela a seguir as velocidades máximas e mínimas (nas profundidades em elas aparecem) e a velocidade na média da profundidade. Todas as medições de campo se deram em período de quadratura.

Tabela 16 – Velocidades máximas e mínimas das medições de campo no ponto de lançamento do Emissário submarino de Santos / São Vicente

Velocidades	13/07/2005 (13 h de medição)	8/10/2005 (13 h de medição)	6/1/2006 (13 h de medição)	6/3/2006 (12 h de medição)
Média	0,11 m/s	0,20 m/s	0,12 m/s	0,19 m/s
Máxima	0,20 m/s (superfície)	0,31 m/s (superfície)	0,22 m/s (superfície)	0,36 m/s (superfície)
Mínima	0,04 m/s (fundo)	0,12 m/s (fundo)	0,07 m/s (meia altura)	0,13 m/s (fundo)
Máxima (média da profundidade)	0,14 m/s	0,25 m/s	0,17 m/s	0,27 m/s
Mínima (média da profundidade)	0,08 m/s	0,16 m/s	0,09 m/s	0,14 m/s

Dos resultados das simulações com o modelo POM, tem-se que:

- Para o período de fevereiro e março de 2002, velocidade máxima (média da profundidade) **0,18 m/s** e mínima de 0,01 m/s (desconsiderados os valores menores que 0,01 m/s que correspondem a menos de 10% do total). A velocidade máxima se deu na superfície numa magnitude de **0,31 m/s**.
- Para o período de julho e agosto de 2002, velocidade máxima (média da profundidade) **0,16 m/s** e mínima de 0,01 m/s (desconsiderados os valores menores que 0,01 m/s que correspondem a menos de 10% do total). A velocidade máxima se deu na superfície numa magnitude de **0,26 m/s**.
- Para o período de julho e agosto de 2005, velocidade máxima (média da profundidade) **0,17 m/s** e mínima de 0,01 m/s (desconsiderados os valores menores que 0,01 m/s que correspondem a menos de 10% do total). A velocidade máxima se deu na superfície numa magnitude de **0,26 m/s**.

Dos resultados obtidos das simulações com o modelo Delft3D, tem-se:

- Para o período de 15 de fevereiro a 8 de março de 2002, velocidade máxima **0,12 m/s** e mínima de 0,02 m/s (desconsiderados os valores menores que 0,02 m/s que correspondem a 19% do total). A velocidade máxima se deu na superfície numa magnitude de **0,16 m/s**.
- Para o período de 21 de julho a 18 de agosto de 2002, velocidade máxima **0,10 m/s** e mínima de 0,02 m/s (desconsiderados os valores menores que 0,02 m/s que correspondem a 13% do total). A velocidade máxima se deu na superfície numa magnitude de **0,15 m/s**.
- Para o período de 23 de julho a 15 de agosto de 2005, velocidade máxima **0,14 m/s** e mínima de 0,02 m/s (desconsiderados os valores menores que 0,02 m/s que correspondem a 30% do total). A velocidade máxima se deu na superfície numa magnitude de **0,16 m/s**.

Partindo-se da premissa que o CORMIX utiliza uma velocidade média de corrente na profundidade, estas serão as velocidades escolhidas para as simulações nesta Tese. Observa-se que estas velocidades foram no máximo de 0,27 m/s nas medições de campo e 0,18 m/s nas simulações.

Com relação à estratificação da coluna d'água, foram adotados os seguintes valores:

- Estratificação caso 1: perfil uniforme, sem estratificação, considerando densidade média na altura da coluna d'água igual a 1.022 kg/m^3 (condição de inverno).
- Estratificação caso 2: estratificação linear (estratificação média), com uma diferença de densidade de 3 Kg/m^3 (ρ superf. = 1.021 kg/m^3 e ρ fundo = 1.024 kg/m^3) (condição de verão).

O Emissário Submarino de Santos / São Vicente está localizado na Baía de Santos com o ponto de lançamento nas coordenadas 7.344.809 N e 362.446 E. Atualmente, o emissário possui uma extensão de 4.000 m em direção à boca da baía. O sistema difusor existente possui 200 m de extensão, nele estão dispostos 40 "risers", espaçados a cada 5,0 m, tendo cada riser orifícios de saída com diâmetro de 0,3 m. A profundidade de descarga é de aproximadamente 8,75 m e a profundidade local é de 10 m. A vazão média de descarga do efluente é de (Q_m = 3,34 m^3/s) e máxima de projeto é de ($Q_{máx}$ = 5,3 m^3/s) (SABESP, 2005a, 2005b).

Para o emissário de Santos / São Vicente existente a configuração atual do trecho difusor, passará por reforma a qual proporcionará melhorias no desempenho do emissário (Licença de Instalação emitida em 3/12/2007). A seguir são apresentadas as características do emissário na situação atual e futura (após reforma):

Situação atual:

- Vazão de descarga = 5,3 m^3/s.
- Profundidade local = 10 m .
- Profundidade de descarga = 8,75 m .
- Comprimento do trecho difusor = 200 m.
- Altura do orifício = 1,20 m.
- Diâmetro do orifício = 0,30 m.
- Número de orifícios = 40.

Situação futura:

- Vazão de descarga = 5,3 m^3/s.
- Profundidade local = 10,7 m .

- Profundidade de descarga = 9,5 m.
- Comprimento do difusor = 390 m.
- Altura do orifício = 1,20 m.
- Diâmetro do orifício = 0,11 m.
- Numero de orifícios = 158.

Neste trabalho são consideradas as características do emissário na condição futura, visto que, esta será a condição do emissário em breve.

Os parâmetros oceanográficos utilizados nas simulações foram definidos com base nos trabalhos anteriores de Marcellino (2000), SABESP (2005a, 2005b) e SABESP (2006), e são apresentados a seguir:

- Concentrações de poluentes na saída da EPC (efluente clorado, com redução de 99% do efluente bruto):
  - Coliformes fecais = 450.000 NMP/100 mL
- Densidade do efluente (Coliformes Fecais) = 998 kg/m^3.
- T90 = 2h^{-1}, com coeficiente de decaimento de 1,1513 h^{-1} .
- Velocidade do vento = 5 m/s.

Assim, considerando o cenário da situação futura de configuração do emissário com a reforma do trecho difusor e admitindo-se a hipótese de situação com a coluna d'água estratificada e não estratificada, tem-se os cenários de simulação definidos:

Tabela 17 – Cenários de simulação para o Campo Próximo

Cenário	Estratificação	Densidade (massa específica) kg/m^3	Velocidade
Cenário 1	Uniforme	1022	V = 0,27 m/s
Cenário 2	Uniforme	1022	V = 0,18 m/s
Cenário 3	Uniforme	1022	V = 0,12 m/s
Cenário 4	Uniforme	1022	V= 0,08 m/s
Cenário 5	Linear	Superfície 1021 Fundo 1024	V = 0,27 m/s
Cenário 6	Linear	Superfície 1021 Fundo 1024	V = 0,18 m/s
Cenário 7	Linear	Superfície 1021 Fundo 1024	V = 0,12 m/s
Cenário 8	Linear	Superfície 1021 Fundo 1024	V= 0,08 m/s

8.5.2 Resultados das Simulações

Na Tabela 18 são apresentados os resultados de classe de fluxo, concentração, diluição, dimensão da pluma e distância em que a pluma atinge o padrão de qualidade, para os 8 cenários simulados no CORMIX 2.

Tabela 18 – Resultados das simulações com CORMIX 2 – Campo Próximo

Cenário	Classe de Fluxo	Concentração no final do Campo Próximo (NMP Coliformes Fecais/100 ml)	Diluição no Final do Campo Próximo	Dimensão da Pluma no final do Campo Próximo		Localização do final do Campo próximo (m)	Distância em que a Pluma atinge o padrão (1000 NMP Coliformes Fecais/100 ml)
				1/2 largura (m)	Altura (m)		
Cenário 1	MU8	2.030,1	196	204,64	9,42	102,32	553
Cenário 2	MU8	2.670,2	138	224,07	9,07	112,04	564
Cenário 3	MU8	2.888,0	105	295,98	7,83	147,99	489
Cenário 4	MU1H	12.759,9	35	196,10	5,90	3,80	548
Cenário 5	MS1	3.454,7	124	198,57	6,15	45,60	804
Cenário 6	MS1	4.196,0	102	199,06	7,58	34,19	646
Cenário 7	MS3	4.194,0	54	514,40	2,30	263,66	743
Cenário 8	MS3	5.606,0	26	561,08	1,54	282,66	675

Com relação às classes de fluxo, para as simulações com densidade uniforme o modelo apresentou a classificação do tipo MU, sendo para as maiores velocidades o MU8 e para a menor velocidade o tipo MU1H. Para as simulações com variação da densidade o modelo apresentou como classificação predominante a classe de fluxo tipo MS1. Para as classes de fluxo temos que Classe MS corresponde ao fluxo afetado pela estratificação linear e conduzindo ao confinamento interno; e a Classe MU corresponde ao fluxo com empuxo positivo em camada de ambiente uniforme.

A seguir são apresentados os gráficos da vista lateral da pluma para os cenários 1 e 5. Nestes gráficos é apresentado o limite do final do campo próximo e inicio do campo afastado, assim como a configuração da pluma.

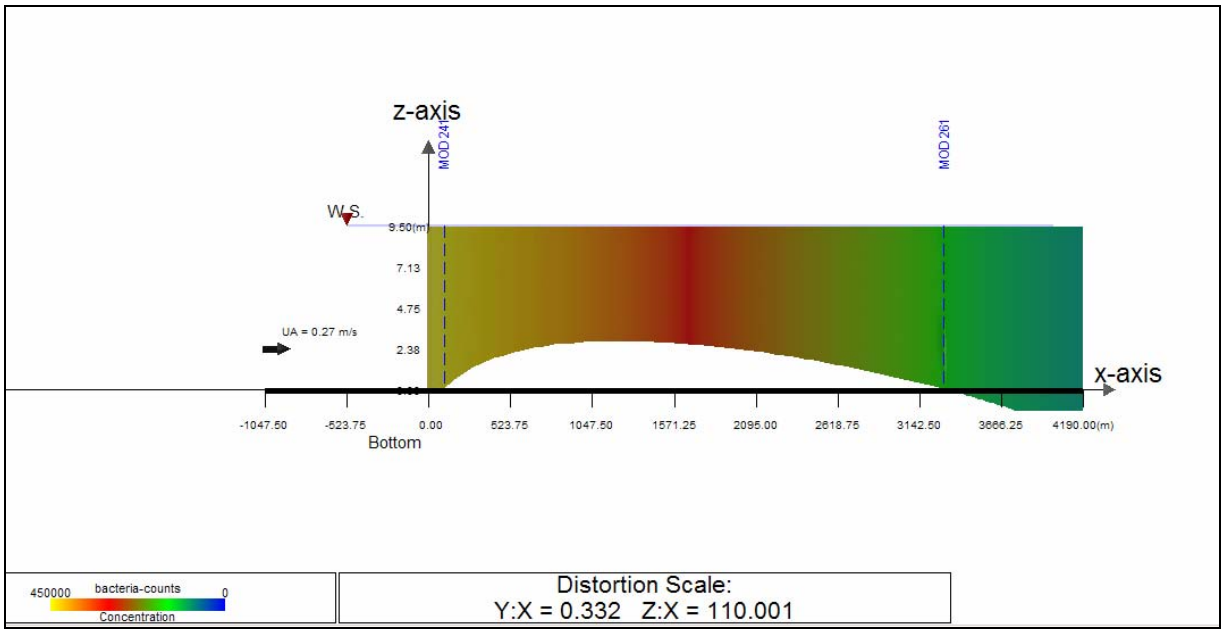


Figura 135 – Vista lateral da pluma para o Cenário 1 – Classe de Fluxo: MU8 - CORMIX

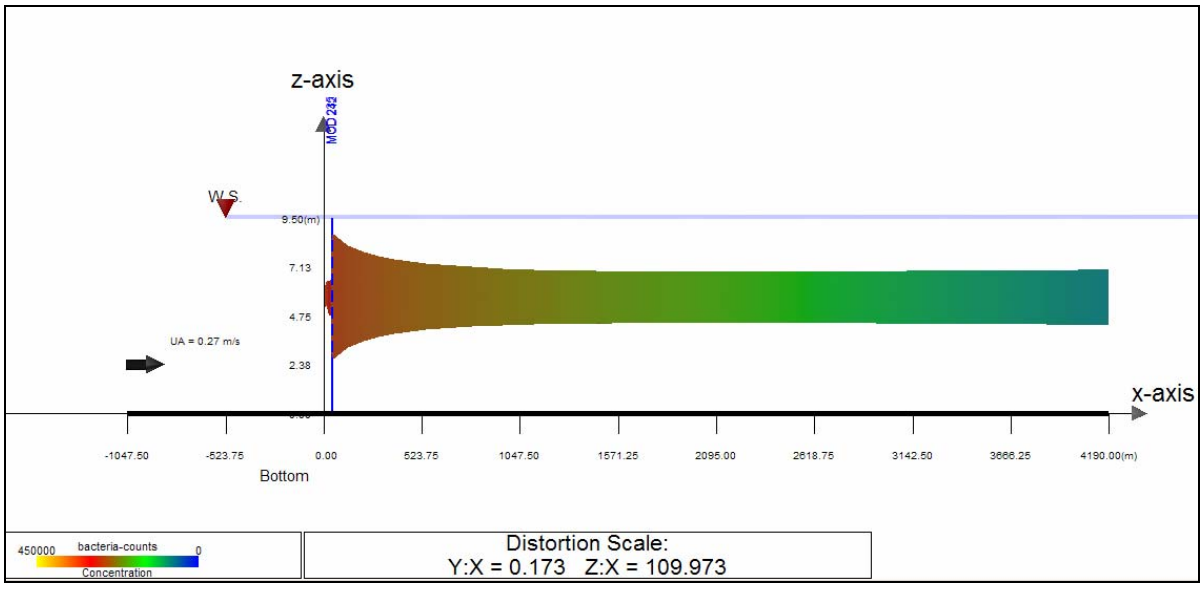


Figura 136 – Vista lateral da pluma para o Cenário 5 – Classe de Fluxo: MS1 - CORMIX

9 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

9.1 Considerações Gerais

Neste capítulo são analisados os resultados das simulações apresentados no Capítulo 8. Os resultados das simulações dos modelos são discutidos em relação a dois pontos distintos. O primeiro é com relação à utilização desses modelos, e como se deu a implementação de cada um deles. O segundo aborda os resultados obtidos com a utilização de cada um dos modelos. Analisa-se a previsão de dispersão dos efluentes na região de estudo, assim como a aplicabilidade dos resultados obtidos e as limitações do uso desses resultados.

9.2 A base de dados utilizada e revisão dos trabalhos anteriores

Com relação aos dados batimétricos, a base de dados digitalizada apresentou-se bastante completa. Houve apenas uma área próxima à Ilha de Alcatrazes com poucas informações, o que dificultou a interpolação da batimetria na região adjacente à ilha.

Os dados de elevação da superfície (maré astronômica) utilizados nas bordas abertas dos modelos matemáticos, através das constituintes harmônicas, apresentaram boa correlação com os dados de maré de medição de campo (maré meteorológica + maré astronômica). Esta correlação foi ainda melhor quando foram acrescentadas as forçantes remotas climatológicas com os resultados de simulação de larga escala com o POM (acrescendo a maré meteorológica).

Quanto ao vento, os dados de reanálise do NCEP são usualmente utilizados para simulação de larga e meso-escala. Por serem dados fornecidos para cada 6 horas, os mesmos perdem a variabilidade local, como a brisa marítima, o que pode ter influenciado os resultados das simulações. No entanto, são os dados disponíveis e utilizados na literatura internacional. Quanto aos dados de vento local, os mesmos sofrem efeitos orográficos e também não são ideais para serem extrapolados para as áreas mais ao largo.

No caso da simulação com o Delft3D, foi possível escolher entre os dados de vento disponíveis (NCEP e vento medido pelo anemógrafo na Praia Grande ou na Ilha das Cabras). Neste caso, foi possível escolher a melhor série temporal de dados e utilizá-los nas simulações.

Na aplicação do MIKE 21 foram utilizados os dados do NCEP para a meso-escala e os resultados desta simulação transferidos para as demais grades. Foi testado o uso do vento local somado ao vento NCEP na grade de Santos. No entanto, de maneira geral os resultados não foram muito satisfatórios.

Assim, entende-se que os dados de vento são dados de entrada importantíssimos na modelagem hidrodinâmica da região de estudo e, no entanto, são os mais complicados e difíceis de serem introduzidos nos modelos, assim como de serem manipulados e ajustados.

Quanto à salinidade e à temperatura, acredita-se que com a massa de dados disponível foi possível escolher valores bem satisfatórios para serem introduzidos nas simulações com o Delft3D. Se houvesse uma série temporal de dados medidos disponível, estes poderiam ser introduzidos no modelo e, assim, poder-se-ia ter verificado qual o ganho que esta informação daria aos resultados.

Com relação às correntes marítimas, foram utilizados dados de praticamente três meses de medição de correntes com ADCP para a comparação com os resultados das simulações. Julgou-se a qualidade e a quantidade de dados apropriada para o estudo. Também foram analisadas quatro séries de dados de medição de corrente efetuadas no Ponto de Lançamento do Emissário Submarino de Santos / São Vicente (Tabela 8 e Figura 41). Estas séries foram utilizadas para avaliar as correntes utilizadas nas simulações de dispersão no campo próximo com o CORMIX 2. Por serem séries muito curtas, de apenas treze horas de medição, não foram utilizadas para a calibração ou comparação direta com os resultados das simulações.

A partir da elaboração da revisão bibliográfica, pode-se concluir pela relevância do tema desenvolvido nesta Tese. Ou seja, os trabalhos apresentados efetivam a justificativa da importância do tema, o que motivou a proposta de avaliação dos modelos matemáticos utilizados.

Também a partir da revisão dos trabalhos anteriores, entende-se que os dados de entrada adotados nesta Tese, como grade batimétrica, maré, vento, salinidade e temperatura, os espaçamentos das grades e as condições de contorno podem ser considerados compatíveis com os usualmente utilizados neste tipo de estudo.

Observa-se que a introdução dos dados de vento com variação temporal e espacial se faz imprescindível nas simulações das áreas maiores (como a meso-escala e Baixada Santista). No entanto, para as áreas menores (como o estuário de Santos) e para avaliações específicas, o vento somente com a variação temporal, ou até mesmo constante, é suficiente. Acredita-se que a forçante do vento (constante, variando no tempo ou no espaço) é sempre uma complicadora nas modelagens matemáticas.

9.3 A utilização dos modelos

A utilização de três diferentes modelos nas simulações hidrodinâmicas proporcionou ao autor conhecer e trabalhar com diversas formas de entrada e saída de dados, definir os parâmetros de calibração de cada modelo (para os modelos Delft3D e o MIKE 21), assim como poder comparar os resultados dos três modelos entre si. Os modelos apresentam características diferentes, trabalham com diferentes processos envolvidos (vento, maré, temperatura e salinidade), e tiveram áreas, espaçamento, número de camadas na vertical, condições de contorno e diferentes coeficientes de calibração. Assim, considera-se que a abordagem apresentou contribuição significativa a esta Tese.

Na Tabela 19 são apresentadas algumas destas diferentes características dos modelos utilizados. Na Tabela 20 é apresentada uma avaliação quanto ao “grau de dificuldade” e aos “recursos disponíveis” que, na visão do autor, caracterizam cada um dos modelos implementados.

Quanto às características, as principais diferenças encontram-se no fato de dois modelos, o POM e o Delft3D, poderem trabalhar no módulo bi e tridimensional e, de poderem ser avaliados os efeitos baroclínicos, além dos barotrópicos.

Cabe lembrar que o uso de modelos tridimensionais deve ser considerado quando existirem fenômenos representativos e importantes nas três dimensões, e que a inclusão de uma dimensão determina o crescimento da demanda de dados de entrada no modelo.

Tabela 19 – Características dos Modelos utilizados

Característica	Modelos Utilizados		
	MIKE 21	Delft3D	POM
Efeitos Barotrópicos	X	X	X
Efeitos Baroclínicos	O	X	X
Módulo Bidimensional	X	X	X
Módulo Tridimensional	O	X	X
Necessidade de Calibração	X	X	X
Possibilidade de criação de grade curvilínea	O	X	X
Discretização das equações por diferenças finitas	X	X	X

Legenda: X – Sim O – Não

Tabela 20 – Avaliação quanto ao "Grau de Dificuldade" de utilização e "Recursos Disponíveis" dos modelos implementados

Parâmetro	Modelos Implementados	
	MIKE 21	Delft3D
Definição das condições iniciais	+ oo	+ ooo
Geração da grade batimétrica	++ oo	++ ooo
Definição das condições de contorno	++ o	+ ooo
Preparação e entrada de dados (pré-processamento)	+++ oo	++ ooo
Processo de calibração	+++	+++
Parâmetros de calibração	oo	ooo
Processo de extração dos resultados (pós-processamento)	+++ oo	+ ooo
Visualização gráfica dos resultados	+ ooo	++ oo

Legenda: Grau de Dificuldade: +++ Complexo; ++ Mediano; + Simples

Recursos Disponíveis: ooo Satisfatório; oo Regular; o Fraco

Nas condições iniciais, ambos os programas são muito amigáveis e simples de serem inicializados. O Delft3D possui mais recursos justamente pelo fato de possuir o módulo tridimensional.

Na geração das grades batimétricas, o Delft3D oferece mais recursos, ou seja, uma diversidade maior de formatos compatíveis para entrada de dados. Além disso, disponibiliza a opção de grades curvilíneas, não utilizadas nesta Tese.

Na definição das condições de contorno, o Delft3D além de ser mais simples também oferece mais recursos que o MIKE 21. No Delft3D a utilização da condição de contorno Neumman foi apropriada para a área modelada. Esta condição foi sugerida pelo Professor D. Roelvink, que tem vários trabalhos nos quais discute e considera a definição das condições de contorno como uma das etapas mais importantes na modelagem. No entanto, mesmo com o MIKE 21 foi possível, após efetuar várias simulações testes, um bom ajuste nas condições de contorno.

Quanto à preparação dos dados de entrada (pré-processamento), o Delft3D apresentou-se um pouco mais simples, embora ambos os programas sejam bastante amigáveis. Por exemplo, na entrada dos dados de maré (elevação da superfície), o MIKE 21 disponibiliza o módulo TIDE para que sejam elaboradas as séries temporais da variação da maré a partir das constituintes de maré (fase e amplitude de cada constituinte), e após a preparação das planilhas e arquivos de entrada, estes sejam agregados ao cenário a ser simulado. No Delft3D estas constituintes podem ser introduzidas diretamente na definição do cenário (arquivo MFD) e o processamento se dá concomitantemente ao processamento do cenário (simulação).

Quanto ao processo de calibração, ambos os programas apresentam o mesmo grau de dificuldade. O processo de calibração em si é complexo por se tratar de um processo recursivo e muitas vezes encaminhado por tentativa e erro. No entanto, a dificuldade de calibração entre os dois modelos é diferente, acredita-se que em função dos recursos disponíveis dos programas. No MIKE 21 a dificuldade está na pequena possibilidade de alteração dos parâmetros. Além dos três parâmetros de calibração escolhidos (coeficiente de atrito do vento, de rugosidade e de viscosidade), é possível modificar batimetria, espaçamento de grade, condições de contorno e transferência de resultados dos contornos abertos, para promover melhoria nos resultados. O entanto, muitos destes parâmetros se mostraram pouco sensíveis na calibração do modelo. No Delft3D, além de todos estes parâmetros, ainda é possível modificar a variação da salinidade e temperatura da água, escolher

a utilização do módulo bi ou tridimensional, escolher o número de camadas no módulo tridimensional e escolher entre batimetria retangular ou curvilínea. Assim, a maior dificuldade do Delft3D é que a sensibilidade do modelo para a maioria dos parâmetros é muito grande, gerando assim uma gama muito grande de opções no processo de calibração.

No pós-processamento, a extração dos resultados apresenta-se mais complexa no MIKE 21, enquanto que o Delft3D apresenta uma disponibilidade maior de recursos. No entanto, o MIKE 21 apresenta melhor visualização dos resultados, ou seja, graficamente a definição é melhor.

Quanto ao tempo de processamento e tamanho dos arquivos, são descritos a seguir para um período de simulação (9/2/2002 a 10/3/2002) efetuada no MIKE 21. Para isto, os parâmetros foram mesurados por grade utilizada. As simulações com o MIKE 21 foram realizadas em um computador Pentium®D CPU 2,66 GHz, 1,00 GB de RAM.

Tabela 21 – Tempo de processamento e tamanho dos arquivos de resultados gerados pelo MIKE 21 no período de simulação de 9/2/2002 a 10/3/2002

Parâmetro	Grade		
	Meso-escala	Baixada	Estuário e Baía de Santos
Espaçamento da grade	2.000 m	300 m	90 m
Número de pontos	25.886 pontos	80.661 pontos	214.131 pontos
“Time Step”	300 segundos	60 segundos	30 segundos
Número total de “Time step”	8.340 “time steps”	35.000 “time steps”	83.400 “time steps”
Intervalo de gravação	6 “time steps”	30 “time steps”	60 “time steps”
Tempo de processamento	3,32 minutos	72,35 minutos	394,25 minutos (6,6 horas)
Tamanho do arquivo	422.091 KB	1.103.441 KB	3.491.366 KB

Para as simulações com o Delft3D os tempos de processamento e o tamanho dos arquivos são apresentados na tabela a seguir. O Delft3D tem características diferentes do MIKE 21 no armazenamento dos resultados. São gerados vários arquivos de resultados, sendo que existe uma limitação de tamanho do arquivo em 4

GB. Portanto, na tabela a seguir é apresentado o tamanho do arquivo considerando a soma de todos os arquivos de resultados para cada período. As simulações com o Delft3D foram realizadas em um computador Pentium®M CPU 1,6 GHz, 504 MB de RAM.

Tabela 22 - Tempo de processamento e tamanho dos arquivos de resultados gerados pelo Delft3D nos períodos de simulação

Parâmetro	Período Simulado		
	Verão 2002	Inverno 2002	Inverno 2005
Número de camadas	5 camadas	10 camadas	3 camadas
Período da Simulação	15/02/2002 a 09/03/2002	20/07/2002 a 18/08/2002	23/07/2005 a 14/08/2005
"Time Step"	2 minutos	2 minutos	1 minuto
Intervalo de gravação	Cada 30 minutos	Cada 30 minutos	Cada 30 minutos
Tempo de processamento	3,4 horas	10,4 horas	4,2 horas
Tamanho do arquivo	4.190.000 KB	11.246.650 KB	2.903.780 KB

9.4 Os resultados dos modelos matemáticos hidrodinâmicos

9.4.1 MIKE 21

Podem ser notados raros problemas nos contornos abertos das grades. Esta melhoria nas condições de contorno deu-se principalmente porque foram estabelecidas variações na borda maior (borda leste), conforme a variação da elevação da superfície (maré) e efeitos de larga escala fornecido pelo POM. No entanto, na borda lateral (borda norte) foram mantidas constantes as variações da borda leste, ou seja, o valor do último ponto ao norte da grade da borda leste foi constante da borda norte. Este procedimento foi efetuado para a batimetria de meso-escala (para identificar as bordas ver Figura 12).

Já na batimetria da baixada, foi feita a transferência da borda da grade maior (meso-escala), no entanto somente a borda leste foi considerada. Nas bordas norte e sul, após vários testes, as séries temporais da variação dos contornos abertos foram estabelecidas como no procedimento acima apresentado. Esta experiência

confirma a importância da definição das condições de contorno, como parâmetro de calibração do modelo.

No que se refere ao uso da metodologia do “transfer boundary”, a mesma deve ser vista com cuidado. Nas simulações se percebe algumas diferenças entre os resultados extraídos em cada uma das diferentes batimetrias (Meso-escala, Baixada e Estuário de Santos), se comparados com os dados de medição de campo.

A importância do aninhamento das grades ou a transferência das bordas está intimamente relacionada ao que se pretende das simulações e aos dados disponíveis para a inicialização no modelo.

Embora o MIKE 21 seja bidimensional e que, o mesmo responde aos efeitos barotrópicos (afetado pela profundidade), houve pequena melhora dos resultados usando-se 3 grades batimétricas. Pode se verificar na Figura 75 que não houve uma melhora significativa, o que ocorreu foi uma melhora no ajuste da magnitude da corrente em um dado período, mas com relação à direção houve uma piora. A utilização de várias grades somente é necessária dependendo dos resultados que se pretende delas. Assim, refinar a batimetria para se obter ganho no resultado não foi o verificado nas simulações com o MIKE 21. Isto corrobora com a orientação do Professor Dano Roelvink, de que, sendo a área de interesse uma região de pequenas dimensões, não existia a necessidade de modelar uma região de meso-escala para transferir os dados para regiões menores. Assim, as simulações com o Delft3D foram concentradas na região do Estuário e Baía de Santos. Em contrapartida, as simulações com o POM apresentaram resultados muito bons e foram gerados a partir de uma grade que cobre a região da Baixada Santista e tem um espaçamento de 1 km.

Quanto à introdução do vento na variação espacial, ela se faz necessária quando são usadas grades em larga e meso-escala. As grades menores podem ser modeladas utilizando-se o vento sem a variação espacial. Isto pode ser verificado com as simulações com o Delft3D que utilizaram os dados de vento do NCEP ou vento local, mas somente com a variação temporal e não espacial e, no entanto gerou bons resultados.

A introdução do vento remoto, ou seja, com a variação de elevação da superfície com a variação da maré astronômica mais a variação da maré meteorológica, apresentou uma melhora nos resultados (ver Figura 44). No entanto, a introdução do vento local, somado ao vento NCEP, melhorou os resultados

somente para um período de inverno de 2005, onde a localização do ponto de medição de corrente é mais próxima à costa. Nos demais períodos não houve melhora nos resultados. Pode-se notar na Figura 45 que a intensidade da corrente é afetada, em alguns instantes particulares.

9.4.2 POM

Os resultados com as simulações com o POM mostraram-se bastante satisfatórias.

Os coeficientes de correlação obtidos com os dados de elevação da superfície foram excelentes para os períodos de 2002, no entanto para o ano de 2005 foi apenas satisfatório (ver Figura 85).

Com relação à comparação entre os dados de velocidade das correntes medidos em campo e os resultados das simulações foram muito bons para os dois períodos de 2002 (Ver: Figura 96, Figura 97 e Figura 98), onde o modelo conseguiu representar os instantes de maiores velocidades das correntes. Os resultados não foram tão bons para o período de inverno de 2005. Acredita-se que para este período a localização do ponto de medição, por ser muito próximo à costa, não pode ser representado pelo modelo.

O POM é um modelo muito utilizado, em trabalhos acadêmicos no Instituto Oceanográfico da USP, para a região da Baixada Santista e em especial na Baía de Santos. Acredita-se que este fato contribui, em muito, para a boa resposta na correlação entre os dados de medição de campo e os resultados obtidos nas simulações.

A comparação realizada nesta Tese contribui para aumentar a confiabilidade do modelo para a área de estudo. Esta validação imprimiu segurança aos dados de velocidade das correntes extraídos para o Ponto de Lançamento do Emissário Submarino de Santos / São Vicente, analisados nesta Tese.

9.4.3 Delft3D

A principal contribuição do uso do programa Delft3D foi o uso do modelo tri-dimensional para uma região em que se acreditava que o modelo bidimensional não supriria as necessidades. Com sua utilização foi possível obter resultados por camadas e com isto poder avaliar as diferenças na circulação que nelas ocorrem.

As simulações com o Delft3D revelaram que os resultados são satisfatoriamente concordantes com os dados de medição de campo, demonstrando que a abordagem adotada foi compatível com a Região do Estuário e Baía de Santos (ver gráficos de correlação na Figura 123). A aplicação da chamada Condição de Contorno Neumann foi uma boa solução. Esta solução consistiu em deixar o modelo determinar a correta solução para a borda pela imposição de gradiente para a variação do nível do mar ao longo das bordas abertas (Leste e Oeste). Para identificar as bordas ver a Figura 18.

A maior dificuldade encontrada no processo de calibração foi justamente estabelecer os parâmetros para a calibração. Entendeu-se que os parâmetros utilizados foram satisfatórios, dados os resultados conseguidos. No entanto, as condições de salinidade e temperatura poderiam ter sido abordadas de maneira diferente. A falta de familiaridade do autor com o modelo tridimensional, o restrito período de treinamento no uso do modelo na Holanda e a implementação inédita do modelo na área estudada, fizeram com que se optasse por introduzir dados constantes na profundidade de salinidade e temperatura na calibração.

9.4.4 Comparação dos resultados dos modelos hidrodinâmicos

Em primeira análise puderam-se constatar as diferenças básicas entre os modelos, já discutidas no item 9.3, quais sejam: um dos modelos considera somente o efeito barotrópico (MIKE 21) e os outros dois modelos consideram, além dos efeitos barotrópicos, os efeitos baroclínicos (POM e Delft3D); o MIKE 21 hidrodinâmico roda em módulo bidimensional enquanto que os demais operam em

módulo tridimensional; o modelo POM está implementado há muito mais tempo, para a região de estudo, enquanto que os demais têm sido recentemente utilizados. Acredita-se que este diferencial faz com que os resultados do POM estejam melhores ajustados às medições de campo.

Dos três períodos simulados, o período em que ocorreu a maior diferença na comparação com os dados de campo foi o de julho e agosto 2005 (inverno 2005), exceto para as simulações com o Delft3D, onde o pior período foi o de inverno 2002. Este período (inverno 2005) também se diferencia dos demais por ter a localização do ponto de medição mais próxima à costa. Este ponto, o ADCP-SABESP está localizado a aproximadamente 3,2 km da linha de costa da Praia Grande (perpendicular à linha de costa), enquanto que o outro ponto, ADCP-CODESP, está localizado a 14,2 km da linha de costa na praia da Baía de Santos (em direção Norte). Nas modelagens as diferenças começam na entrada de dados para este período, no Delft3D foi utilizado o vento local ao invés do vento NCEP, por proporcionar um melhor ajuste nos resultados. No MIKE 21 foi utilizado o vento local somado ao vento NCEP, para se obter melhor correlação em uma pequena fração deste período. Enquanto que no POM, para este mesmo período, a correlação com os dados de campo foi a menor, sendo que o modelo não conseguiu atingir as velocidades máximas alcançadas nas medições de campo.

Entende-se que o fator mais relevante para estas diferenças esteja na localização do ponto de medição, que por estar mais próximo à costa, este ponto estaria mais sujeito à variação do vento local, não tão bem representado no POM, e parcialmente melhor representado no MIKE 21 e Delft3D.

Na comparação direta dos resultados dos três modelos (Figura 134), para o período do Verão de 2002, pode-se notar que os três modelos representaram satisfatoriamente as condições hidrodinâmicas reais. Os coeficientes de correlação encontrados para o período de Verão de 2002 foram de 0,63 com o MIKE 21 (considerado 20 dias de processamento); 0,80 com o Delft3D (considerando 20 dias) e 0,70 com o POM (considerando 30 dias), todos para a Componente x (Componente E-W do vetor velocidade).

9.5 Caracterização da hidrodinâmica da circulação local

A partir dos resultados das simulações e dos dados de medição de campo, é possível caracterizar a hidrodinâmica da circulação local, muitas vezes corroborando com os resultados dos estudos anteriores. A seguir são apresentadas, de forma itemizada, estas características.

- Quanto à circulação das águas na Baía de Santos, é basicamente a maré que determina a hidrodinâmica das correntes. Tal característica pode ser observada nos resultados extraídos no ponto de lançamento do emissário submarino de Santos das modelagens com o POM e o Delft3D (ver: Figura 99, Figura 100, Figura 101, Figura 102, Figura 103, Figura 104, Figura 124, Figura 125, Figura 126, Figura 127 e Figura 128). Nos mapas de correntes extraídos do Delft3D e do MIKE 21 (grade de Santos) podem ser observadas as diferenças entre os períodos de sizígia e quadratura. Embora as velocidades mais ao largo sejam influenciadas pelos efeitos meteorológicos, no centro da Baía e nos canais naturais prevalecem os efeitos da maré.
- Na região da entrada da Baía, próxima a linha imaginária que liga a Ponta de Itaipu e Ponta Grossa, existe uma forte influência da circulação costeira onde domina o sentido NE e SW, ou seja, paralelo à Praia Grande. Esta característica é mostrada na Figura 74 e nos mapas de correntes do Estuário e Baía de Santos, apresentados no Capítulo 8.
- Outra característica da circulação e que influi na dispersão dos efluentes na Baía de Santos, é que, sendo a circulação dominada pela maré, ocorrem velocidades muito baixas nas estofas de maré.
- É verificada a característica de rotação das correntes no sentido anti-horário.
- É verificada a diferença entre as velocidade na camada superficial e nas camadas de ½ água e fundo, notada principalmente nos gráficos de velocidade extraídos do Ponto de Lançamento do Emissário Submarino de Santos / São Vicente. Estas diferenças também podem ser observadas nos

gráficos de medição de campo apresentados na Figura 41, nos gráficos do POM (da Figura 99 a Figura 104) nos gráficos do Delft3D (da Figura 124 a Figura 128) e nas figuras do Delft3D (Figura 112 e Figura 113).

- Para a região fora da Baía, na Praia Grande, as condições meteorológicas exercem grande influencia na circulação. Pode-se comparar que alguns dos períodos de maiores velocidades da corrente, no ponto ADCP-CODESP foram os períodos que sucederam às maiores velocidades do vento. Por exemplo, no período de 16/2/2002 a 25/02/2002 os ventos atingiram velocidade superiores a 4 m/s (até 5,5 m/s), advindos na maior parte do tempo de S-SW, com situação de inversão advindo de N, o que possivelmente provocaram correntes mais intensas (acima de 30 cm/s na média da profundidade) no período de 23/2/2202 a 3/3/2002 com direção para E e situação de inversão para W (ver: Figura 28 e Figura 35). Pode-se notar que as maiores velocidades ocorreram na superfície.
- Quanto às simulações considerando a vazão turbinada em Cubatão de 90 m^3/s, os resultados sugerem que a influência desta descarga turbinada em Cubatão fica restrita ao canal do Porto, e que este fluxo ao ser escoado para o interior da Baía é dissipado, não causando influência significativa nas velocidades das correntes no Ponto de Lançamento do Emissário Submarino de Santos / São Vicente. Em contrapartida, num evento de ventos estas correntes, no ponto de lançamento dos emissários, são efetivamente influenciadas. Esta afirmativa fica restrita aos parâmetros adotados nestas simulações, sendo que esta análise é apenas especulativa, visto que este valor de descarga turbinada não ocorre atualmente.

9.6 A previsão de dispersão de efluentes na região

9.6.1 Dispersão da pluma do Emissário Submarino de Santos / São Vicente

De acordo com o discutido na caracterização da circulação na Baía de Santos, no item anterior, e da metodologia seguida no item 6.2.4.1, foram escolhidos cenários para as simulações com CORMIX. Nestes cenários procurou-se incluir velocidades de correntes, na média da profundidade, o mais próximo possível do que elas realmente ocorrem.

Com relação aos esgotos domésticos, lançados pelo emissário submarino de Santos / São Vicente, nos resultados das simulações com o CORMIX, observa-se que para as velocidades mais altas, a diluição aumenta e o limite do campo próximo diminui. Este resultado é o esperado, pois quanto maior a advectiva do ambiente melhor o processo de dispersão. As velocidades mínimas se dão principalmente nas estofas de maré, visto que esta região, onde se encontra a saída do emissário de Santos / São Vicente, é uma área dominada pela forçante da maré. As concentrações de coliformes fecais ficam reduzidas abaixo de 1.000 NMP/100 mL a mais de 3 Km das praias.

Nas velocidades mais baixas, a diluição inicial é bastante baixa, também. Assim, menores concentrações de contaminantes, inclusive a concentração padrão exigida pela legislação, se dá no campo afastado. O que não é problema, pois como pode ser verificado nos mapas de corrente e nas trajetórias traçadas a partir do ponto de lançamento do emissário, a pluma alcança a saída da Baía influenciada pela circulação costeira. Entretanto, o maior tempo de residência pode propiciar condições eutróficas próximo ao local de lançamento dos esgotos. Também, há de se notar que para avaliar de maneira mais real a dispersão dos efluentes lançados pelo emissário de Santos é necessária modelagem de campo afastado, sendo que a concentração padrão exigida pela legislação se dá no campo afastado (para todos os cenários analisados).

Cabe lembrar que na aplicação do CORMIX 2, os resultados no campo próximo permitem avaliar a eficiência de diluição de uma alternativa de sistema difusor. No entanto, a utilização de seus resultados no campo distante é questionável, porque nesta região (campo afastado) a pluma é transportada pelas correntes marinhas, ou seja, conduzida pela hidrodinâmica local. Assim, considera-se questionável a solução do CORMIX 2 para o campo afastado, pois o software considera uma única velocidade agindo na coluna d'água, enquanto que na natureza esta velocidade é variável tanto temporal como espacialmente.

Com relação à densidade, a sua variação vertical de densidade é diretamente responsável pelo processo de mistura do efluente com o meio. Quanto maior for a estratificação do meio, menos o efluente se mistura com a água e, portanto menores são as elevações alcançadas pela pluma.

De acordo com Harari e Gordon (2001), em simulações numéricas da dispersão de substâncias no Porto e Baía de Santos, foi concluído que: as manchas associadas ao emissário submarino ao considerar somente as marés, têm extensão espacial muito limitada; que somente a ação dos ventos pode produzir uma dispersão mais significativa das substâncias; e apenas ventos muito fortes soprando por longo período, em direções muito favoráveis, podem levar substâncias advindas do emissário, ao nível da superfície, para as praias. Esta afirmativa pode ser corroborada e complementada pelos resultados apresentados nesta Tese.

9.6.2 Dispersão de manchas de óleos na Baixada Santista

Considerando a área de estudo da Baixada Santista e a partir dos resultados das simulações, na hipótese de um acidente com derramamento de óleo na região, são apresentadas algumas previsões de caminhamento das manchas, como segue:

- Foram analisadas as áreas de fundeadouros dos navios que atracam no Porto de Santos (Figura 78). Nas trajetórias traçadas com o MIKE 21, na grade de Meso-escala (ver Figura 79 e Figura 80), pode-se observar que a partir da área mais próxima à praia (área para fundeadouros de emergência), eventuais vazamentos de hidrocarbonetos podem atingir a praia. Para os demais locais de fundeadouros os mesmos efluentes leves teriam sua dispersão para ao largo. Para as áreas internas (estuário e Baía de Santos), foram traçadas trajetórias a partir das simulações na grade de Santos (Figura 81). Pode-se observar no ponto interno destinado a navios com calado máximo de 9 metros, um efluente decorrente de um eventual vazamento provavelmente sua dispersão se dará no estuário e terá dificuldade de alcançar a Baia e a regiões ao largo. O ponto destinado a navios de guerra o efluente acompanhará a forçante da maré e sairá da Baía ao alcançar a linha imaginária que liga a Ponta de Itaipu e Ponta Grossa. Já o ponto destinado a navios para inspeção sanitária terá tendência de sair da Baía.
- Para derramamento dentro da Baía de Santos, como é mostrado na Figura 73, Figura 74 e Figura 81, a forçante dominante é a maré e uma eventual mancha estará sujeita ao “vai e vem” das marés enchente e vazante.

Quando a mancha alcançar a linha imaginária que liga a Ponta de Itaipu e Ponta Rasa, esta estará sujeita à circulação costeira dominada pelo efeito meteorológico.

Cabe lembrar que, estas previsões são baseadas em mapas de trajetórias e/ou mapas de correntes e não foram utilizados programas de computador específicos que avaliam a dispersão de manchas de óleo.

Assim, as áreas mais sujeitas à contaminação, seja por efluentes domésticos e/ou hidrocarbonetos e/ou águas de lastro dos navios, são: (a) Ponta Grossa, Ponta Rasa e Ponta da Munduba, por serem pontos de barramento para as plumas e manchas; (b) região do ponto de lançamento do emissário de Santos / São Vicente por ser uma área de baixas velocidades das correntes e por ser dominada pela maré, ocorrendo freqüentes estofas o que praticamente zera a velocidade das correntes para a inversão da direção das mesmas; (c) o próprio Estuário e Canal do Porto, em havendo contaminação e/ou derramamento de óleo nestes locais.

9.7 A aplicabilidade dos resultados obtidos

A expectativa é de que modelagem matemática (modelos oceânicos) seja amplamente usada em setores operacionais das empresas que atuam nas áreas petrolíferas e nas companhias de saneamento que possuem emissários submarinos de esgotos, assim como por órgãos responsáveis pelo controle de atividades potencialmente poluidoras no mar.

Cabe notar que os coeficientes de correlação obtidos no processo de calibração devem ser compreendidos e analisados dentro de margens de erro pouco mensuráveis. Os resultados das simulações matemáticas aqui apresentados são frutos de processos hidrodinâmicos complexos numa região específica e contam com parâmetros e dados de inicialização nem sempre tão fiéis à realidade. Soma-se a isso o fato de que as comparações entre os resultados do modelo e os dados de medição de campo foram efetuadas em pontos restritos no espaço e no tempo.

Assim, entende-se que um modelo hidrodinâmico abastecido de dados de campo, como definição da batimetria, condições maré e vento; e bem calibrado (com

comparações com dados de medição de corrente), deverá permitir um prognóstico apurado da trajetória de efluentes leves, favorecendo a adoção de medidas que possam evitar, por exemplo, que elas atinjam uma área rica em biodiversidade, ou que atinjam as praias. O modelo matemático não é uma expressão exata da realidade, no entanto é capaz de bem representá-la, possibilitando compreender esta realidade.

9.8 Recomendações para trabalhos futuros

Tendo sido bastante satisfatória a utilização do modelo hidrodinâmico Delft3D para a região da Baía e Estuário de Santos, recomenda-se para trabalhos futuros que, para a região da Baixada Santista e para a Baía de Santos, seja dada continuidade na utilização o modelo. Nos próximos trabalhos poderiam ser consideradas grades curvilíneas, e variação temporal e espacial da salinidade e temperatura.

No que diz respeito ao emissário submarino de Santos / São Vicente, entende-se que os resultados das simulações com os três modelos imprimiram confiabilidade para os resultados de velocidade das correntes extraídos para o ponto de lançamento. No entanto, devido à importância deste emissário para os municípios de Santos e São Vicente, acredita-se que o comportamento hidrodinâmico desta região deveria ser mais explorado, sendo que, dentro do possível deveriam ser feitas mais medições de correntes no ponto de lançamento do emissário e mais estudos de modelagem da pluma, principalmente em campo afastado. Neste contexto, recomenda-se a utilização do modelo de qualidade, o Delft3D-WAQ, que utiliza resultados do modelo hidrodinâmico Delft3D-FLOW, poder-se-ia simular a dispersão da pluma dos emissários em campo afastado.

10 CONCLUSÕES

Prever a hidrodinâmica da circulação das águas e a dispersão de contaminantes nos corpos d'água, principalmente em regiões costeiras, tem sido um problema a ser enfrentado por engenheiros, devido ao aumento dos impactos ambientais que envolvem as obras e a gestão da engenharia costeira. Os modelos computacionais são ferramentas imprescindíveis para o estudo de dispersão de plumas de poluentes.

Esta Tese abrange: a implementação e análise crítica da utilização de diferentes modelos matemáticos hidrodinâmicos, MIKE 21, POM e Delft3D; caracterização da hidrodinâmica da circulação das águas na RMBS; e avaliação da dispersão de efluentes leves na RMBS (campos próximo e afastado).

A abordagem da utilização de três modelos, MIKE 21, POM e Delft3D, para modelagem matemática da hidrodinâmica da circulação da área de estudo, apresentou significativa contribuição para as principais conclusões da Tese e demonstrou, na prática, diferenças na utilização dos modelos matemáticos.

As conclusões mais expressivas obtidas neste estudo são apresentadas a seguir:

- Na avaliação quanto ao "grau de dificuldade de utilização" e "recursos disponíveis" dos modelos implementados (MIKE 21 e Delft3D), o Delft3D apresenta grau de dificuldade de utilização de "simples" a "mediano", enquanto que o MIKE 21 de "mediano" a "complexo". Quanto aos recursos disponíveis, o Delft3D apresenta recursos "satisfatórios" e o MIKE 21 "regular".

- Os três modelos utilizados apresentaram bons resultados, os coeficientes de correlação encontrados, entre os resultados das simulações e dados de medição de campo, para o período de Verão de 2002 foram para o MIKE 21 de 0,63 (considerado 20 dias de processamento); o Delft3D de 0,80 (20 dias) e o POM de 0,70 (30 dias), para a Componente x (Componente E-W do vetor velocidade). Nota-se que o POM obteve melhor correlação para maiores períodos de comparação (30 dias), para o MIKE 21 e o Delft3D, esta boa

correlação só foi possível considerando períodos menores de comparação (de 5 a 20 dias).

- No MIKE 21 o uso de três diferentes grades e a utilização do recurso “transfer boundary” não trouxe ganho significativo aos resultados na grade menor (Grade do Estuário e Baía de Santos, com maior resolução). A mesma região de Santos (e praticamente a mesma área) modelada pelo Delft3D, sem a utilização da transferência de dados nas bordas abertas por modelos de meso-escala, apresentou melhores resultados. Portanto, quando a região de interesse for de pequenas dimensões, restrita a um estuário, baía ou enseada, não existe a necessidade da utilização do recurso do “transfer boundary”, disponível no MIKE 21, desde que esta área de interesse tenha suficientes dados de entrada e o modelo seja devidamente calibrado.
- A comparação entre os resultados da modelagem com os modelos tridimensionais, o POM e o Delft3D, e os dados de medição de campo, imprimiram confiabilidade aos dados de correntes extraídos para o Ponto de Lançamento do Emissário Submarino de Santos /São Vicente. Os resultados obtidos por camadas foram importantes para a avaliação da dispersão da pluma.
- A forçante que determina a circulação hidrodinâmica na Baía de Santos é a maré. São nítidas as diferenças entre enchente e vazante e entre os períodos de sizígia e quadratura. Também, são evidentes as diferenças de magnitude e direção entre as correntes superficiais e as correntes nas demais camadas, em profundidade. Pode-se afirmar que somente a ação dos ventos trará um significativo grau de dispersão aos poluentes no interior da Baía de Santos, isto em camadas superficiais, sendo que em profundidade a tendência é ter baixa dispersão dos poluentes.
- Saindo da Baía de Santos e ultrapassando a linha imaginária que liga a Ponta de Itaipu e Ponta Grossa, a circulação costeira dominante ocorre na direção NE – SW, paralela à Praia Grande.
- As máximas velocidades, na média da profundidade, no Ponto de Lançamento do Emissário Submarino de Santos / São Vicente são de 0,27 m/s e, somente na superfície estas velocidades podem chegar a 0,35 m/s. As

velocidades mínimas são realmente baixas, pois sempre que ocorre a inversão das correntes, nos períodos de enchente para vazante e vice-versa, ocorrem as estofas de maré.

- Na avaliação com o CORMIX, os resultados mostraram que para as maiores velocidades (0,27 e 0,18 m/s) as diluições iniciais são superiores a 100 e que nas velocidades mais baixas (0,08 e 0,12 m/s) a diluição inicial é baixa (menor que 100). A concentração padrão (1.000 NMP Coliformes Fecais / 100 ml) é atingida em campo afastado.
- As áreas utilizadas para fundeadouros dos navios que atracam no Porto de Santos estão localizadas de forma que, na área mais próxima à costa (fundeadouro de emergência), eventuais vazamento de hidrocarbonetos ou lançamentos de águas de lastro podem atingir as praias. Para os demais locais de fundeadouros os mesmos efluentes leves teriam sua dispersão para o largo.

Julga-se que este trabalho contribuiu para a obtenção de um maior grau de conhecimento sobre as questões práticas da modelagem matemática hidrodinâmica. Ou seja, esta contribuição é um passo fundamental para que o assunto seja visto de uma forma mais realista, mostrando e discutindo as características e limitações teóricas e práticas existentes, sob a ótica da engenharia.

Entende-se que, tanto o MIKE 21, quanto o Delft3D foram pouco testados para a região de estudo, se comparados à utilização e a experiência do POM no Instituto Oceanográfico. Assim, com os resultados revelados nesta Tese, uma das principais conclusões é que um trabalho de modelagem hidrodinâmica de circulação em regiões costeiras não deve ser um trabalho esporádico e temporário. Tanto melhor será entendido o comportamento hidrodinâmico de uma área costeira através de modelagem matemática, quanto maior for o esforço dispensado, tanto computacional, quanto humano.

Com os bons resultados apresentados, refletindo um bom ajuste dos modelos hidrodinâmicos utilizados para a região, a extrapolação destes resultados no tempo e no espaço é possível. No entanto, é sempre recomendável uma análise crítica quando se fizer uso desta extrapolação.

De acordo com as proposições iniciais e com os resultados expostos, conclui-se que foi cumprido o objetivo da Tese de fazer uma análise crítica da utilização de modelagem matemática, mostrando resultados de três diferentes modelos hidrodinâmicos para uma mesma região de estudo; obtendo-se assim um ganho na avaliação da dispersão de efluentes.

11 Referências Bibliográficas

ALFREDINI, P. **Obras e gestão de portos e costas: a técnica aliada ao enfoque logístico e ambiental**. Editora Edgar Blücher. São Paulo. 2005.

ALFREDINI, P. e col. **Projeto de preparo de base batimétrica digitalizada para a costa do Estado de São Paulo**. Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Convênio DAEE-USP. 2002.

ARASAKI, E. **Sistemas predominantes de tratamento de esgoto na costa paulista – metodologia para a tomada de decisão.** 350p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.

BAPTISTELLI, S. C. **Modelação numérica da circulação de correntes de maré e induzidas pelo vento aplicada a estudos de disposição oceânica de efluentes na Praia Grande – São Paulo**. 168p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 2003.

BLENINGER, T. **Coupled 3D hydrodynamic models for submarine outfalls: Environmental hydraulic design and control of multiport diffusers**. Doctoral thesis presented to Institute for Hydromechanics, University Karlsruhe, Alemanha. 2006.

BRASIL. **Resolução n.º 453, de 03 de dezembro de 1998.** Homologa os montantes de energia e potência asseguradas das usinas hidrelétricas pertencentes as empresas das Regiões Sudeste, Centro-Oeste, Norte e Nordeste. ANEEL. 1998.

BRASIL. **Resolução CONAMA n.º 274, de 29 de novembro de 2000.** Dispõe sobre a classificação das águas doces, salobras e salinas, em todo o Território Nacional, bem como determina os padrões de lançamento. CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. 2000.

BRASIL. **Resolução CONAMA n.º 357, de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. 2005.

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

CAMARGO, R.; HARARI, J. Modelagem numérica de ressacas na plataforma sudeste do Brasil a partir de cartas sinóticas de pressão atmosférica na superfície. **Boletim do Instituto Oceanográfico**, São Paulo, v.42, n.1,p.19-34. 1994.

CETESB. **Emergências químicas. Tipos de acidentes. Vazamentos de óleo**. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/emergencia/acidentes/vazamento/vazamento.asp>. Acesso em: 7 de novembro de 2006.

____. **Águas. Praias. Legislação**. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/Agua/praias/legislacao.asp>. Acesso em: 3 de janeiro de 2007.

CODESP – Companhia DOCAS do Estado de São Paulo. **Pesquisa de determinação de áreas de descarte de material de dragagem na zona oceânica exterior à Baía de Santos**. Trabalho realizado pela Universidade Santa Cecília – UNISANTA para a CODESP. Relatório Final. 2002.

COSTA, F.P. **Solução numérica de equações diferenciais. Mini curso**. Universidade Estadual de Santa Cruz. 2002

CUNHA D.L.N.; ROSMAN P.C.C.; FERREIRA A.P.; MONTEIRO T.C.N. Hydrodynamics and water quality models applied to Sepetiba Bay. **Continental Shelf Research**. v.26, p. 1940-1953, 2006.

DELFT-3D-FLOW. **Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments – User Manual**. Netherlands. November. 2006.

DHI - DANISH HYDRAULIC INSTITUTE. **MIKE 21 – Coastal hydraulics and oceanography – Tidal analysis and prediction module". Release 2.7 – User Guide**. Denmark. 1998.

____. **Coastal hydraulics and oceanography – Hydrodynamic Module – Reference Manual and Scientific Documentation**. Denmark. 2000.

FEITOSA R.C. & ROSMAN P.C.C. **Emissários submarinos de esgoto: aspectos de qualidade de água e modelagem computacional**. In: Métodos numéricos em recursos hídricos (Volume 8). Capítulo 1, Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH. Porto Alegre. 2007.

FORTIS, R.M. **Modelagem computacional da dispersão da pluma do efluente dos emissários submarinos do TEBAR – PETROBRÁS**. Dissertação (Mestrado) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 181p. 2005.

FUNDESPA. **Levantamento Oceanográfico de parâmetros correntométricos e da estrutura termohalina na área do Emissário Submarino de Santos – SABESP**. São Paulo. 1996.

____. **Características oceanográficas da região costeira do Estado de São Paulo**. Trabalho elaborado para SABESP. São Paulo. 1998.

____. **Levantamento Oceanográfico da área diretamente afetada por efluentes dos Emissários de esgotos da SABESP, entre os municípios de São Sebastião e Mongaguá, Estado de São Paulo – Relatório Final**. São Paulo. 1999.

GÓIS, J. S. **Análise da evolução morfológica da linha de costa com a técnica de traçadores em modelo de fundo fixo de obras costeiras**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 126p. São Paulo. 2004.

GORDON, M. **Modelagem da dispersão de substâncias no Porto e Baía de Santos**. Dissertação (Mestrado). Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo. 128p. 2000.

GRACE, R. A. **Marine outfall systems – planning, design, and construction**. New Jersey. 1978.

HARARI, J. **Modelos numéricos aplicados a processos costeiros e estuarinos**. Notas de aulas do curso de Pós-graduação em Oceanografia Física no Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. São Paulo. 1989.

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

____. Modelagem numérica da região costeira de Santos (SP): Circulação de maré. **Revista Brasileira Oceanografia**. v.46, n.2, p.135-156, 1998.

HARARI, J; GORDON, M. Simulações Numéricas da Dispersão de Substanciais no Porto e Baía de Santos, sob ação de marés e ventos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH**. v. 6. n.4: p.115-131. Out / Dez 2001.

HIDROCONSULT. **Investigações e estudos realizados para o projeto do sistema de disposição oceânica dos esgotos de Santos e São Vicente**. São Paulo. 1974.

HIDROCONSULT – Consultoria, estudos e projetos S.A. **Sistema de esgotos sanitários de Praia Grande – Investigações Oceanográficas – Resultado das campanhas de medição**. São Paulo. 1976.

HR WALLINGFORD. **Santos Bay Project – Preliminary Hydraulic Study**. Hydraulics Research Report. Report EX2241. 1990.

INPH – Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias – **Campanha de medições na baía de Santos e enseada de São Vicente**. Rio de Janeiro. 1974.

MARCELINO, E.B. – **Sistematização dos projetos de emissários submarinos da Sabesp e avaliação de desempenho através do modelo Computacional CORMIX**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

MELLOR, G.L. **User Guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model**. Princeton University. Princeton. 2004.

MONTENEGRO, A. **Estudo da circulação forçada por ventos e marés na Baía de Todos os Santos e Plataforma Continental Adjacente. Simulações com modelo oceânico da Universidade de Princeton (POM).** Dissertação (Mestrado). Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo. 1999.

NUCLEBRÁS – Empresas Nucleares Brasileiras – **Relatórios trimestrais do processo de campanhas de medição oceanográficas na região das praias do Una e do Rio Verde, no litoral Sul do Estado de São Paulo**. Relatórios Finais de 1982 a 1984.

ORTIZ, J.P.; FORTIS, R.M.; LAMPARELLI, C.C.; NIETO, R. Análise computacional comparativa da dispersão da pluma de efluente dos emissário submarinos do Tebar – PETROBRÁS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH**. v. 12, n.1, p. 117-132. Jan/Mar, 2007.

PICARELLI, S. S. **Análise da hidrodinâmica da região costeira Centro-Sul do estado de São Paulo através de modelagem numérica – Efeito de maré, de ventos e do campo de densidade**. Tese (Doutorado). Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo. 115p. 2006.

____. **Modelagem numérica da circulação de maré na região costeira Centro-Sul do estado de São Paulo**. Dissertação (Mestrado). Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo. 2001.

PORTO DE SANTOS. **O Porto de Santos – DCQ – Água de Lastro**. Disponível em: <http://www.portodesantos.com.br/qualidade/lastro.html>. Acesso em: 3 de janeiro de 2007.

PORTO DE SANTOS. **Áreas de fundeio externas**. Disponível em: <http://www.portodesantos.com.br/authority/infra/fundeio.html>. Acesso em: 28/04/2008.

ROBERTS, P.J.W. “Line Plume and Ocean Outfall Dispersion”. **Journal of Hydraulics Division, ASCE**, v.105 (HY4), p. 313-330. 1979.

ROELVINK, D; WALSTRA, D.J. “Keeping it simple by using complex models”. **Advances in Hidro-Science and Hydro-Engineering**. v. VI. 2004.

SABESP. **Estudo da interferência entre as plumas dos emissários submarinos da SABESP no Canal de São Sebastião – Considerações técnico-ambientais e modelagem de dispersão**. Relatório SABESP - Departamento de Planejamento Técnico – TTP. Novembro/2003.

SABESP. **Considerações sobre as exigências técnicas formuladas pela CETESB, para emissão da licença de instalação da ampliação e adequação do sistema de esgotos sanitários integrado dos Municípios de Santos e São Vicente – Parecer Técnico Nº 025/04/Eeel/Eeql** - Relatório Final – Julho/2005a.

SABESP. **Estudo de otimização do sistema difusor do emissário submarino de Santos/São Vicente**. Relatório SABESP – Departamento de Gestão e Desenvolvimento Operacional da Baixada Santista – RSO. Rev. 1. Dezembro/2005b.

SABESP. **Programa de monitoramento ambiental da área sob influencia dos emissários submarinos de esgotos de Santos / São Vicente e Praia Grande Subsistemas 1, 2 e 3**. Relatório Final. São Paulo. 2006.

SABESP. **Cursos emissários submarinos de esgotos sanitários – Histórico, noções de projeto, operação e legislação**. Relatório SABESP – Departamento de Empreendimentos – RNE. São Paulo. Julho/2006a.

SisBAHIA - Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental. **Sobre o SisBAHIA®**. Disponível em <http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/>. Acesso em: 25 de abril de 2008.

SONDOTÉCNICA – **Estudo diagnóstico do comportamento hidráulico e sedimentológico na baía de Santos – Estuário Santista**. São Paulo. 1977.

SOTO, Y.J.M. – **A Modelagem hidrodinâmica como apoio a tomada de decisão em caso de derrame de óleo na parte interna do complexo estuarino Antonina-Paranaguá-PR**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2004.

UNESCO-IHE. **Water Engineering Department**. Disponível em: <http://www.unesco-ihe.org/education/sp cepd.htm>. Acesso em: 25/05/2006.

____. **Hydraulic engineering-coastal engineering and port development (CEPD).** Disponível em: <http://www.unesco-ihe.org/we/cepd.htm.> Acesso em: 25/5/2006.

UNISANTA – Universidade Santa Cecília – **Pesquisa para determinação de áreas de descarte de material de dragagem na zona oceânica exterior à baía de Santos.** Relatórios Parciais de outubro/98 a abril/99. São Paulo.

VAN RIJN, L. C. “Sediment transport Part III: bed forms and alluvial roughness”. **Journal of Hydraulic Engineering, ASCE**, v. 110, n. 12, Dezembro, 1984.

YASSUDA, E. A. **Modelo numérico do transporte de sedimentos no canal principal do estuário de Santos**. Dissertação (Mestrado). Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. 1991.

WROBEL, L.C. **Introdução aos métodos numéricos**. In: Métodos numéricos em recursos hídricos (Volume 1), Capítulo 1, Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH. Rio de Janeiro. ABRH. 1989.