

**"ESTUDO HIDRO E MORFODINÂMICO DO
IMPACTO DE ALTERAÇÕES NA CONFIGURAÇÃO
DO PORTO DE RIO GRANDE"**

Igor Augusto Melém Carneiro
Orientador Elisa Helena Leão Fernandes
Co Orientador Wilian Correa Marques

Rio Grande
Julho 2009

Dissertação de Mestrado apresentada à
Comissão de Curso de Pós-Graduação em
Oceanografia Física, Química e Geológica da
Universidade Federal do Rio Grande
para obtenção do grau de Mestre em
Oceanografia Física, Química e Geológica

Aos meus pais

Eliana e Francisco Carneiro

“No meio da dificuldade encontra-se a oportunidade.” – Albert Einstein.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer meus pais pela oportunidade e o total apoio em todas as horas, essencial para que esse trabalho fosse concluído.

A minha orientadora Elisa, pela oportunidade, paciência e participação definitiva para a conclusão deste.

Agradecimento especial ao Wilian, pela ajuda incondicional no trabalho e pelos ensinamentos sobre o modelo e outros assuntos científicos e não científicos.

Ao Rafael Gonçalves pelos ensinamentos sobre o modelo e ajuda em todos os momentos.

Aos professores do Laboratório de Oceanografia Física que de alguma forma contribuíram para a minha formação.

Ao amigo Ítalo Braga, que no começo de tudo, foi um grande companheiro.

Aos amigos do Laboratório de Oceanografia Física: Prof. Osmar, Tierry, Huguinho, Cabeção, Tremembé, Igor Monteiro, Lorena, Marcos, Curiri, Bruninho, Paula, Carla, André Vitta, Hirata, e Fujita pelas dicas e que de alguma forma contribuíram também para esse trabalho.

A Susi, Gandra, Júlia, Koga, Liane, Colors, Letícia, Wilson, Artur, Preto, Lumi, Bahia, Buda, Rob, Luti, Jeane pelas conversas e festas ao longo do mestrado.

A Ana Paula Berger, imprescindível nos momentos finais e nas horas mais difíceis.

Aos amigos que ficaram e não me deixaram esquecer de onde sou.

Aos seguranças da FURG que abriam as portas da Universidade aos sábados e domingos sem reclamar.

RESUMO.....	I
ABSTRACT.....	II
LISTA DE FIGURAS.....	III
LISTA DE TABELAS.....	VIII
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 2 – OBJETIVOS.....	10
CAPÍTULO 3 – ÁREA DE ESTUDO.....	11
3.1 – DESCRIÇÃO DA ÁREA.....	11
3.2 – CARACTERÍSTICAS SEDIMENTARES.....	14
3.3 – CARACTERÍSTICAS HIDRODINÂMICAS.....	18
CAPÍTULO 4 – MATERIAL E MÉTODOS.....	22
4.1 – O MODELO TELEMACH2D.....	23
4.2 – APROXIMAÇÕES ASSUMIDAS PELO TELEMACH2D.....	27
4.2.1 – EQUILÍBRIO HIDROSTÁTICO.....	27
4.2.2 – INCOMPRESSIBILIDADE DO FLUIDO.....	27
4.2.3 – IMPERMEABILIDADE DA SUPERFÍCIE E FUNDO.....	27
4.3 – MODELAGEM DA TURBULÊNCIA.....	27
4.4 – O MODELO SEDIMORPH.....	28
4.4.1 – CÁLCULO DA TENSÃO COM O FUNDO.....	29
4.4.2 – CÁLCULO DA CAPACIDADE DE TRANSPORTE DE SEDIMENTO DE FUNDO.....	30
4.4.3 – CÁLCULO DO FLUXO DE EROSIÃO.....	31
4.4.4 – CÁLCULO DA EVOLUÇÃO DO FUNDO.....	32
4.5 – CONSTRUÇÃO DA GRADE NUMÉRICA.....	33
4.5.1 – DADOS BATIMÉTRICOS.....	33

4.5.2 – GRADE BATIMÉTRICA.....	34
4.6 – CONDIÇÕES DE CONTORNO DO MODELO HIDRODINÂMICO.....	36
4.6.1 – FRONTEIRA OCEÂNICA.....	36
4.6.2 – FRONTEIRA CONTINENTAL.....	36
4.6.3 - CONTORNO SUPERFICIAL.....	37
4.7 – CONDIÇÕES INICIAIS DO MODELO MORFODINÂMICO.....	38
4.8 – PARÂMETROS FÍSICOS UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES HIDRO E MORFODINÂMICA.....	41
4.9 – VALIDAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO.....	42
4.10 – TESTES DE SENSITIVIDADE DO SEDIMORPH AO COEFICIENTE DE EROSÃO.....	44
4.11 – CENÁRIOS SIMULADOS.....	46
4.12 – ANÁLISE DA CIRCULAÇÃO DA REGIÃO DO PORTO NOVO.....	48
4.13 – ANÁLISE DOS PROCESSOS REFERENTES À DEPOSIÇÃO DA FRAÇÃO DE SILTE NA REGIÃO DO CANAL DO PORTO NOVO.....	48
CAPÍTULO 5 – RESULTADOS.....	51
5.1 – HIDRODINÂMICA DO ESTUÁRIO DA LAGOA DOS PATOS.....	51
5.2 - CONDIÇÕES HIDRODINÂMICAS DA REGIÃO DO PORTO NOVO.....	57
5.3 – RESULTADOS MORFODINÂMICOS.....	62
5.3.1- FRAÇÃO DE SILTE DEPOSITADA.....	62
5.3.2 – FLUXOS DE DEPOSIÇÃO.....	65
5.4 – ESPECTRO CRUZADO DE POTÊNCIA, ANÁLISE DE COERÊNCIA E ATRASO DE FASE ENTRE O FLUXO DE DEPOSIÇÃO E A COMPONENTE LONGITUDINAL DA VELOCIDADE.....	68
5.5– MODOS DE VARIABILIDADE DA DEPOSIÇÃO DE SILTE.....	70

5.6 – EVOLUÇÃO DO FUNDO DO CANAL DO PORTO NOVO.....	72
5.7 – VELOCIDADE RESIDUAL NA ÁREA DO PORTO NOVO.....	73
5.8 – ESTUDO DE CASO: ESTRUTURA DE AJUSTE DE FLUXO.....	74
5.8.1 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS MORFODINÂMICOS ENTRE OS CENÁRIOS.....	76
5.8.2 – FLUXOS DE DEPOSIÇÃO.....	79
5.8.3 – ESPECTROS DE POTÊNCIA, ANÁLISE DE COERÊNCIA E FASE ENTRE OS CENÁRIOS.....	81
5.8.4 – EVOLUÇÃO DO FUNDO.....	83
CAPÍTULO 6 – DISCUSSÕES.....	88
CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES.....	96
BIBLIOGRAFIA.....	98

RESUMO

A maioria dos portos ao redor do globo estão localizados em regiões estuarinas. Nessas regiões a sedimentação pode se tornar um sério problema, devido aos sedimentos conduzidos pelos rios depositarem nos canais de navegação, que devem ser dragados freqüentemente para permitir a entrada de navios com calados maiores. O Porto de Rio Grande, localizado na Lagoa dos Patos e é o maior Porto da região sul do Brasil em volume de transporte de cargas. A sedimentação na área do Porto de Rio Grande é controlada pela variação do vento e das descargas fluviais. O aumento das atividades e a necessidade de melhorar suas instalações levam a operações de dragagem permanente, que podem causar sérios problemas ambientais ao ressuspender compostos tóxicos no fundo, além de possuir um alto custo operacional. Devido ao seu baixo custo de operação, a modelagem numérica da hidrodinâmica e do transporte sedimentar se torna uma grande ferramenta para a compreensão do processo de assoreamento do canal e investigar o efeito de uma estrutura que ajuste as correntes em uma das áreas mais afetadas por esse fenômeno. A necessidade de representar a batimetria complexa de um corpo estuarino leva à necessidade de usar um modelo de elementos finitos, que neste trabalho, foi utilizado o modelo hidrodinâmico TELEMAC-2D acoplado com o modelo morfológico SEDIMORPH que utiliza areia grossa, areia fina e silte como classes granulométricas. No trabalho, primeiramente, foi dada ênfase na circulação barotrópica na sua porção estuarina com dados de vento e descarga fluvial do ano de 2002, caracterizadas por altos valores de descarga no período de inverno no complexo do Rio Guaíba, Rio Camaquã e Canal do São Gonçalo devido ao fenômeno “El Niño”. Posteriormente, a hidrodinâmica responsável pela deposição de sedimentos finos na bacia do Porto Novo, mais precisamente o silte, foi analisada. A hidrodinâmica do canal de acesso, devido à forma irregular da ilha do Terraplino, é caracterizada por zonas de recirculação geradas pelos fluxos de vazante e enchente as quais são caracterizadas por águas aprisionadas com velocidades favoráveis a sedimentação. A sedimentação é controlada pela descarga e pela atuação dos ventos, principalmente os que são provenientes das direções NE e SO. As zonas de recirculação são identificadas através de linhas de correntes, geralmente na transição entre os ventos de NE para SO e vice-versa. Os resultados morfodinâmicos indicam que a porção final do canal do Porto Novo apresenta maior tendência deposicional de sedimentos finos, coincidindo com os menores valores de velocidade e as zonas de recirculação. O efeito da colocação de uma estrutura (parede de deflexão) foi simulado com o intuito de ajustar a configuração do canal de acesso do Porto Novo e diminuir os efeitos da sedimentação. Devido ao modelo ser bidimensional, as escalas de evolução do fundo são subestimadas, pois além da necessidade de simulações em três dimensões, o modelo utilizado não possui um modelo de consolidação de sedimento, portanto estes se comportam como sedimentos não-coesivos.

ABSTRACT

Most of the harbors around the world are located in estuarine regions. In these areas sedimentation can become a serious problem because the sediment load carried by the rivers deposit in the navigation channels and must be constantly dredged to accommodate deeper draft vessels. Rio Grande Harbor is located inside the Patos Lagoon, and is the major harbor in the southern Brazil. The sedimentation inside the Rio Grande Harbor area is dominated by currents driven by the wind effect and river discharge. The increasing navigation activities and the necessity of improving its facilities lead to permanent dredging operations. These constant dredging may cause serious problems to the environment, changing the circulation and sediment transport patterns, ressuspending toxic compounds lying in the bottom, besides from presenting high costs. Due to its low cost of operation, the numerical modeling of the hydrodynamics and sediment transport became an important tool to comprehend the process of siltation and investigate the effect of constructing a deflecting wall in one of the most affected areas of Rio Grande Harbor. The necessity of representing the highly variable bathymetry of the studied area leads to the necessity of using a finite elements model, which can represent the variation of the smaller scale circulation in complex bathymetry environments. The model used is the TELEMAC-2D model coupled with the morphodynamic model SEDIMORPH that uses coarse sand, fine sand and silt as granulometric classes. Firstly, the barotropic circulation in the estuarine zone was studied during an ENSO- El Niño event, which was characterized by high fluvial discharges. After that, the hydrodynamics responsible for depositional processes of fine sediments in Porto Novo was investigated. Due to the irregular shape of Terraplano Island, the hydrodynamics of the access channel is characterized by low-velocities trapped waters where suspended matter tends to deposit. The sedimentation is controlled by fluvial discharges and wind action, mainly from the NE and SW directions. These recirculation zones are identified by streamline functions of the hydrodynamic model, usually during the transition from NE to SW winds and vice-versa. The morphodynamic results indicate significant depositional trends in the final portion of the access channel, in accordance with the low-velocity zones. A structure has been simulated in the numerical grid of the domain in order to adjust the current inside the access channel and reduce the depositional trends. An increase of the velocity is responsible for reducing the deposition flux, and consequently the bottom evolution. That method keeps the sediment moving, in a manner that reduces the deposition in the channel area. Due to limitations of the model, the bottom evolution is underestimated, indicating the necessity of a three-dimensional simulation.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Localização do Porto Novo de Rio Grande (Fonte: Google Earth - 24/02/2009).....	4
FIGURA 2: Localização da Lagoa dos Patos.....	12
FIGURA 3: Região estuarina da Lagoa dos Patos.....	13
FIGURA 4: Canal do norte.....	13
FIGURA 5: Sedimentos de fundo da Lagoa dos Patos.....	15
FIGURA 6: Diagrama Textural do estuário da Lagoa dos Patos.....	16
FIGURA 7: Rios afluentes da Lagoa dos Patos.....	19
FIGURA 8: Representação esquemática dos níveis de elevação devido à resultante da ação local e remota do vento. Modificado de Möller <i>et al</i> (2001).....	21
FIGURA 9: Acoplamento entre o TELEMAC2D e o SediMorph.(Gonçalves, 2007)....	22
FIGURA 10: Estrutura da malha de volumes finitos do SediMorph (adaptado de Malcherek et al 2005).....	29
FIGURA 11: (A) Malha total usada na simulação (B) Região da Lagoa dos Patos.....	34
FIGURA 12: Refino da malha na área do Porto Novo.....	35
FIGURA 13: Representação da batimetria na Lagoa dos Patos (A) e detalhe da região estuarina (B) e na Região do Porto Novo (C).....	35
FIGURA 14: Contornos líquidos da grade.....	36
FIGURA 15: Soma das descargas dos rios Jacuí e Taquari (A), utilizados na fronteira do delta do Jacuí, e descarga do rio Camaquã (B), em $m^3.s^{-1}$, referentes ao ano de 2002...37	37
FIGURA 16: Distribuição inicial de silte no fundo na Lagoa dos Patos.....	38
FIGURA 17: Distribuição inicial de areia fina no fundo na Lagoa dos Patos.....	39
FIGURA 18: Distribuição inicial de areia grossa na Lagoa dos Patos.....	39
FIGURA 19: Distribuição inicial de silte no fundo no Porto Novo.....	40

FIGURA 20: Distribuição inicial de areia fina no Porto Novo.....	40
FIGURA 21: Distribuição inicial de areia grossa no Porto Novo.....	41
FIGURA 22: Comparação dos dados brutos medidos na Estação da Praticagem (azul) e do modelo (vermelho).	43
FIGURA 23: Comparação das oscilações menores que 30 hrs medidos na Estação da Praticagem (azul) e do modelo (vermelho).....	43
FIGURA 24: Comparação das oscilações maiores que 30 hrs medidos na Estação da Praticagem (azul) e do modelo (vermelho).....	44
FIGURA 25: Simulações das estruturas de correção da corrente no canal do Porto Novo.....	47
FIGURA 26: Pontos da análise do campo de velocidade no canal do Porto.....	48
FIGURA 27: Pontos de coletas das séries temporais dos dados morfodinâmicos.....	49
FIGURA 28: Vento de nordeste após 10 dias de simulação, em período de baixa descarga.....	51
FIGURA 29: Elevação do nível do mar e vetores velocidade de corrente com a ação do vento de NE (6 m.s^{-1}) e baixa descarga fluvial após 10 dias de simulação.....	52
FIGURA 30: Ventos do quadrante sul após 31 dias de simulação, em período de baixa descarga.....	53
FIGURA 31: Elevação do nível do mar e vetores velocidade de corrente com a ação do vento de SO (9 m.s^{-1}), após 31 dias de simulação.....	53
FIGURA 32: Ventos do quadrante sul após 171 dias de simulação, em período de alta descarga.....	54
FIGURA 33: Elevação do nível do mar e vetores velocidade de corrente com a ação do vento de SO (7 m.s^{-1}), após 171 dias de simulação.	54
FIGURA 34: Ventos do quadrante sul após 175 dias de simulação, em período de alta descarga.....	55
FIGURA 35: Elevação do nível do mar e os vetores velocidade de corrente com a ação do vento de SO (3 m.s^{-1}), após 175 dias de simulação.....	55
FIGURA 36: Ventos do quadrante norte após 182 dias de simulação, em período de alta descarga.....	56

FIGURA 37: Elevação do nível do mar e os vetores velocidade de corrente com a ação do vento de NE (3 m.s^{-1}), após 182 dias de simulação.....	56
FIGURA 38: Vetores velocidade de corrente em regime de vento a) NE ($1,5 \text{ m.s}^{-1}$) após 10 dias de simulação e b) SO (5 m.s^{-1}), após 31 dias de simulação na área do Porto Novo em períodos de baixa descarga ($< 800 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).....	58
FIGURA 39: Vetores velocidade de corrente em regime de vento A) (3 m.s^{-1}), após 175 dias de simulação, e B) NE (7 m.s^{-1}), após 182 dias de simulação na área do Porto Novo em períodos de alta descarga (aprox. $8.000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).....	59
FIGURA 40: Intensidade e direção da velocidade de corrente ao longo do canal nos pontos P1, P2, e P3.	60
FIGURA 41: Linhas de corrente (em vermelho) indicando a zona de recirculação na transição de ventos NE para SO, após 48 dias de simulação.....	61
FIGURA 42: Linhas de corrente (em vermelho) indicando a zona de recirculação na transição de ventos de SO para NE após 52 dias de simulação.....	62
FIGURA 43: Fração de silte depositado na área do Porto Novo após 1 ano de simulação.....	63
FIGURA 44: Variação do Silte ao fim da simulação na região do canal do Porto.....	64
FIGURA 45: Variação no percentual de deposição de silte nos pontos S1,S2,S3,S4,S5.....	64
FIGURA 46: A) Velocidade da corrente, B) Fluxo de deposição (azul) e tensão de fundo (vermelho) no ponto S1.....	66
FIGURA 47: A) Velocidade da corrente, B) Fluxo de deposição (azul) e tensão de fundo (vermelho) no ponto S4.....	67
FIGURA 48: A) Velocidade da corrente, B) Fluxo de deposição (azul) e tensão de fundo (vermelho) no ponto S5.....	68
FIGURA 49: Análise espectral cruzada entre o fluxo de deposição e componente longitudinal da velocidade da corrente.....	69
FIGURA 50: Espectro de coerência e fase. A linha preta indica um nível de significância de 95%.....	70
FIGURA 51: Modo de variabilidade mais significativo.....	71
FIGURA 52: Espectro de potência da deposição de silte.....	71

FIGURA 53: Evolução do fundo na área do Porto Novo. Valores positivos indicam deposição, enquanto que valores negativos indicam erosão.....	72
FIGURA 54: Série temporal de evolução do fundo nos pontos (A) S1, (B) S4,S5.....	73
FIGURA 55: (A) Intensidade dos vetores de velocidade residual. (B) Porcentagem de silte depositado ao término da simulação.....	74
FIGURA 56: Estrutura de ajuste de fluxo na região do Porto Novo.....	75
FIGURA 57: Representação da estrutura durante a ação de vento SO (6 m.s^{-1}), mostrando a alteração das linhas de fluxo na parte inferior do canal do Porto Novo....	76
FIGURA 58: Comparação do padrão de deposição de silte na região do Porto Novo para os cenários (A) Cenário atual (B) Cenário com a estrutura.....	77
FIGURA 59: Comparação da deposição de silte no Ponto S1 Cenário atual (azul) Cenário com a estrutura (vermelho).....	78
FIGURA 60: Comparação da deposição de silte no Ponto S4 Cenário atual (azul) Cenário com a estrutura (vermelho).....	78
FIGURA 61: Comparação da deposição de silte no Ponto S5 Cenário atual (azul) Simulação com a estrutura (vermelho).....	79
FIGURA 62: Comparação o Fluxo de deposição no Ponto S1 entre o cenário atual (preto) e a situação proposta com a estrutura (vermelho).....	80
FIGURA 63: Comparação o Fluxo de deposição no Ponto S4 entre o cenário atual (preto) e a situação proposta com a estrutura (vermelho).....	80
FIGURA 64: Comparação o Fluxo de deposição no Ponto S5 entre o cenário atual (preto) e a situação proposta com a estrutura (vermelho).....	81
FIGURA 65: Comparação entre os espectros cruzados de potencia entre a simulação original (preto) e a situação proposta com a estrutura (vermelho).....	82
FIGURA 66: Comparação entre os espectros cruzados de potencia entre a simulação original (preto) e a situação proposta com a estrutura (vermelho).....	82
FIGURA 67: Comparação nos dados de evolução do fundo na região do Porto Novo entre os cenários (A) Cenário atual (B) Cenário com a estrutura.....	84
FIGURA 68: Comparação da evolução entre os dois cenários no ponto S1.....	85
FIGURA 69: Comparação da evolução entre os dois cenários no ponto S4.....	85
FIGURA 70: Comparação da evolução entre os dois cenários no ponto S5.....	86
FIGURA 71: Parede de deflexão de correntes instalada no Porto de Hamburgo (Kuijper, 2005).....	90

FIGURA 72: Representação esquemática do projeto: (a) sem parede (b) com parede. Adaptada de Kuijper (2005).....	91
FIGURA 73: Representação esquemática da separação de fluxos. (A- Ponto de junção (attachment point), S- Ponto de separação (separation point).....	92
FIGURA 74: Analogia da figura de Allen (1970) para a região do Porto Novo. (J-Ponto de junção;S- Ponto de separação.).....	92

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: Taxa trimestral do sedimento dragado entre os anos de 1920 e 1944.....	4
TABELA 2: Distribuição dos sedimentos por profundidade.....	17
TABELA 3: Localização e tipo de fundo.....	17
TABELA 4: Principais Parâmetros Utilizados No TELEMAC2D.....	42
TABELA 5: Índice da qualidade da simulação (Walstra, 2001).....	42
TABELA 6: Principais parâmetros utilizados no SediMorph.....	44
TABELA 7: Testes de sensibilidade para M_{sed}	45
TABELA 8: Profundidade dos pontos.....	48
TABELA 9: Diferença do silte acumulado nos dois cenários.....	86
TABELA 10: Diferença na evolução do fundo nos dois cenários.....	87

1 – INTRODUÇÃO

Descritos como zonas de transição entre o oceano e o continente, os estuários são ambientes reconhecidos pela sua importância ecológica e sócio-econômica. Isto ocorre por serem ambientes férteis, pois recebem nutrientes dos compartimentos continental e oceânico, estimulando a produção primária (Miranda *et al*, 2002). Conseqüentemente, o ambiente estuarino é abundante no que diz respeito a recursos pesqueiros, principalmente aqueles de valor comercial, formando um alicerce para as ocupações urbanas.

Os estuários representam um ambiente dinâmico onde ocorrem processos de grande variabilidade espaço-temporal, estando sujeitos a forçantes locais e não-locais que influenciam sua qualidade da água, geomorfologia e batimetria. Essas características estão associadas à sua localização estratégica para a expansão de grandes cidades em zonas costeiras ao redor do globo terrestre, bem como ao desenvolvimento de atividades portuárias. Logo, os estuários são ambientes suscetíveis às atividades antrópicas estando sujeitos a diversos impactos naturais ou provocados pela navegação.

O Brasil possui mais de 35 portos ao longo dos 8.500 km da sua costa atlântica. Apesar das diferentes modalidades de carga, infra-estrutura e ambientes, problemas comuns relacionados com as operações portuárias e seu crescimento, assoreamento e operações de dragagem, e suas conseqüências na qualidade ambiental e das águas são observados com freqüência.

Entretanto, os portos brasileiros são reconhecidos como gargalos logísticos ao crescimento mais consistente da economia brasileira. Mesmo com a profissionalização das atividades portuárias, o Brasil ainda não dispõe de um sistema portuário capaz de competir em nível internacional. Em outras palavras, para que o custo das operações portuárias no Brasil seja reduzido, investir em infra-estrutura é fundamental.

Nos últimos anos, a combinação entre fatores como a demanda ambiental e comercial, e a necessidade de manutenção e expansão da atual infra-estrutura geraram a necessidade de ampliação das atividades portuárias brasileiras, assim como a realização de obras. Tais obras têm por objetivo possibilitar a manutenção e/ou aumento do calado e evitar o comprometimento das condições de navegabilidade nos canais de acesso, com potenciais conseqüências sócio-econômico-ambientais em cascata para economia do país.

Na maioria dos casos, os portos estão localizados em estuários que, por sua vez, podem estar sujeitos a aportes sedimentares consideráveis e, conseqüentemente, a problemas de assoreamento. Com freqüência, essa carga sedimentar se deposita no estuário, reduzindo a profundidade do canal de acesso, bacia de evolução e berços de atracação. Operações de dragagem se tornam necessárias e são realizadas com certa regularidade. Além do alto custo financeiro envolvido, essas operações também podem causar efeitos ambientais consideráveis, que vão desde a alteração da circulação local, do padrão de transporte de sedimento, e do tempo de residência de partículas e substâncias no interior do estuário (Kjerfve, 1986), até a remobilização de compostos potencialmente nocivos ao ser humano e à biota, como compostos orgânicos e metais pesados, dejetos urbanos e industriais, e insumos agrícolas que estão misturados ao sedimento de fundo (Clark, 1977, Svavarsson *et al* 2001; Stronkhorst, 2002; Santos *et al*, 2004; Bemvenuti *et al*, 2005).

Dos três portos organizados do Estado do Rio Grande do Sul, o Porto do Rio Grande é o mais importante, sendo considerado um dos grandes portos do Mercosul. Além de ser o único porto marítimo do Estado, ele apresenta uma localização geográfica privilegiada, pois possui conexão com todo o Estado, o País e diversos países do Mercosul. Nos últimos anos, a combinação entre fatores como a demanda ambiental e

comercial, e a necessidade de manutenção e expansão da atual capacidade do Porto de Rio Grande, gerou a necessidade de realização de obras portuárias e dragagens visando à melhoria das condições de navegabilidade do seu canal de acesso.

Em Julho de 2001, como parte do programa “Avança Brasil”, de responsabilidade do Ministério dos Transportes do Governo Federal, foi autorizado o início das obras para o prolongamento dos Molhes da Barra de Rio Grande. Esta obra tem como objetivo criar condições para a realização da dragagem de aprofundamento do calado de 14 para 18 metros, e para a correção da geometria do canal de acesso ao Porto de Rio Grande, tornando o Porto de Rio Grande o maior porto do Mercosul (<http://www.portoriogrande.com.br/~jornal/noticias>). Esta obra previa a extensão em 500 metros no Molhe Leste e em 900 metros no Molhe Oeste. Essa construção foi classificada como uma obra de planejamento necessária para atender futuras demandas da economia de toda região sul, e deverá tornar o Porto de Rio Grande o maior porto do Mercosul. Recentemente a Secretaria Especial de Portos (SEP) do Governo Federal modificou o projeto para que a extensão feita seja de 200 m no Molhe Leste e 300 m no Molhe Oeste, com a convergência da boca para aproximadamente 600 m. Embora essas obras sejam necessárias para a expansão das atividades de navegação no Porto de Rio Grande, os seus efeitos sobre o processo de assoreamento do canal de navegação ainda não são completamente compreendidos.

Historicamente, um dos locais mais afetados pelo assoreamento é a área da bacia do Porto Novo (artificialmente construída) (Figura 1). Segundo o relatório de Monitoramento Ambiental da Operação de Dragagem do Porto de Rio Grande, realizado em 2001, estudos feitos na bacia do Porto Novo entre 1922 e 1944, já indicavam taxas de assoreamento relativamente altas, com variação trimestral de 14.000 metros cúbicos entre julho e setembro, a 39.000 metros cúbicos de janeiro a março.



Figura 1: Localização do Porto Novo de Rio Grande (Fonte: Google Earth - 24/02/2009)

Entre 1980 e 1995, a Superintendência do Porto de Rio Grande (SUPRG) efetuou dragagens em 19 áreas entre a Barra de Rio Grande e a Doca do Yacht Club de Rio Grande (Figura 1). A Bacia do Porto de Rio Grande foi o local mais freqüentemente dragado, com média anual de 110.044 m³, enquanto que o Canal de Acesso do Porto de Rio Grande foi o local de maior volume dragado, atingindo um máximo de 3.640.531 m³ em 1987. A grande quantidade de operações de dragagem nessa área é comprovada por estudos feitos por engenheiros do Departamento Estadual de Portos Rios e Canais (DEPREC), que analisaram os volumes de sedimento dragado entre os anos 1922 a 1944. Este volume chegou à faixa dos 20.000 metros cúbicos mensais (Tabela 1).

Tabela 1: Taxa trimestral do sedimento dragado entre os anos de 1920 e 1944.

JANEIRO – MARÇO	39.000 metros cúbicos
ABRIL – JUNHO	13.000 metros cúbicos
JULHO – SETEMBRO	14.000 metros cúbicos
OUTUBRO- DEZEMBRO	28.000 metros cúbicos

Ao longo do tempo, algumas técnicas de ação direta ou indireta têm sido empregadas no mundo para diminuir o assoreamento dos canais de navegação. A aplicação de jatos de água nos intervalos entre o regime de vazante e de enchente, por exemplo, impede a deposição do silte/argila no Porto de Charleston, Carolina do Sul-EUA. Esse sistema tem como objetivo reduzir os gastos com manutenção do calado, que podem chegar a \$750.000,00 (Setecentos e cinquenta mil dólares) por ano (Bryant & Moseley, 2007). No entanto, a utilização de estruturas para amenizar, alterar ou auxiliar a hidrodinâmica local com a finalidade de reduzir as condições favoráveis à deposição de sedimentos em áreas de interesse dos portos, seja sob a ação de ondas (Silva *et al*, 2000, Dibajnia *et al*, 2004; Ferrarin *et al*, 2008) ou de correntes (Winterwerp, 2005; Kuijper *et al*, 2005) figura como recurso importante e vem recebendo maior atenção nos últimos tempos. Entretanto, essas obras ainda não são bem difundidas no Brasil. Esforços são preferencialmente direcionados a localizar áreas para o descarte do material dragado, onde aproveitam a hidrodinâmica local para a dispersão dos sedimentos. Colares (2007) fez um estudo preliminar de modelagem numérica sobre descarte do material dragado do Porto de Rio Grande na zona estuarina e concluiu que com baixa descarga esse sedimento depositaria novamente nos canais.

Estudos de métodos para reduzir o assoreamento de canais de navegação foram conduzidos no Porto de Hamburgo nos anos 70. Modelos hidráulicos produzidos em laboratório e modelos numéricos foram utilizados para simular as diferentes configurações para a construção de uma estrutura que levasse a um decréscimo na taxa de deposição de sedimentos (Kuijper *et al*, 2005; Winterwerp, 2005). Esses estudos levaram à construção de uma parede de deflexão de correntes com o objetivo de evitar a formação de zonas de recirculação na área do porto. Estas zonas são responsáveis pela deposição de sedimentos finos na área. Esse estudo durou cerca de uma década, e

promoveu uma redução de 60% no assoreamento no Porto de Hamburgo (Winterwerp, 2005).

Os impactos ambientais decorrentes dessas obras portuárias são geralmente pouco conhecidos devido ao alto grau de complexidade existente na interação entre os processos físicos, geológicos, químicos e biológicos típicos de ambientes costeiros como os estuários (Ghosh *et al*, 2001). Com o avanço da capacidade computacional, uma das maneiras mais eficientes de se compreender - e eventualmente prever - os efeitos de tais atividades em regiões costeiras é a combinação entre o uso de modelos numéricos e a coleta de dados de campo (Staneva *et al*, 2009).

Essa combinação vem propiciando uma mudança na abordagem de estudos ambientais em geral e de ecossistemas aquáticos em particular. De uma abordagem qualitativa, passou-se a uma quantificação cada vez mais apurada dos processos envolvidos. Os aspectos hidrodinâmicos são ainda hoje os melhores compreendidos e, portanto, os fenômenos melhor reproduzidos pela modelagem numérica. De acordo com FitzGerald & Knight (2005), “ambientes aquáticos como estuários são caracterizados por uma forte interação com outros processos, como biológicos (ex. plâncton, peixes), geológicos (ex. transporte de sedimentos e evolução do fundo) e químicos (ex. qualidade de água)”, e, portanto, ainda não são devidamente conhecidos para que seus efeitos possam ser incluídos na formulação teórica dos modelos numéricos.

Dentro deste contexto, a disponibilidade e utilização de um modelo numérico hidrodinâmico e de transporte de sedimento, em suas versões bi- e tri-dimensional, que represente com alta resolução as condições batimétricas e hidrodinâmicas é de fundamental importância. Jones & Davies (2005, 2006) compararam as técnicas de diferenças finitas e elementos finitos, utilizando o modelo TELEMAC, para o mar Céltico e da Irlanda. Analisaram as forçantes de maré e vento, respectivamente, e

concluíram que o modelo de elementos finitos, por trabalhar com maior resolução espacial, apresenta melhor resolução do fluxo em escalas de centenas de metros, representado pelas regiões dos canais de ligação entre o oceano e o rio. Esses mesmos autores utilizaram o TELEMAC para analisar a distribuição espacial das componentes de maré mais importantes no costa da Grã-Bretanha e sugerem que esses estudos necessitam de uma grade de alta resolução além de uma boa representação da topografia para melhores resultados, que são melhores representados pelos modelos de elementos finitos (Jones & Davies, 2007).

O processo de assoreamento de canais de navegação é resultado de uma combinação de fatores como: a configuração batimétrica do porto em questão, condições ambientais (parâmetros meteo-oceanográficos), tipo de sedimento, fonte de sedimentos e instalações portuárias (Ghosh *et al*, 2001). Portanto, a compreensão desses fatores em pequena e grande escala é fundamental para o cálculo das taxas de assoreamento nos canais de navegação.

Estudos de modelagem numérica apresentaram as características hidrodinâmicas (Möller, 1996; Möller *et al*, 2001; Fernandes, 2001; Fernandes *et al*, 2001, 2002; 2004, 2007, 2008) e de transporte de sedimento (Marques *et al.*, 2009), e as conseqüências da extensão dos molhes da Barra de Rio Grande (Schiller *et al*, 2003; Costa, 2005; Fernandes *et al*, 2005). Mais recentemente, Fernandes *et al* (2008), estudaram as alterações hidrodinâmicas, deposicionais e erosivas de dois cenários: aprofundamento do Porto Novo e do Terminal de São José do Norte (14 metros) e do canal de acesso (20 metros). Essas alterações sugerem modificações no padrão de entrada de água salgada e de circulação, além de mudanças nos padrões deposicionais e erosivos na área do porto organizado. Entretanto, nenhum desses estudos considerou a construção de estruturas que levassem a um decréscimo na taxa de deposição de sedimentos.

O Porto de Rio grande é o maior porto da região sul e o único porto marítimo do estado do Rio Grande do Sul. Sua criação remonta o ano de 1847 quando foi instituído o primeiro Porto de Rio Grande, atualmente chamado de Porto Velho. Devido ao clima “hostil” da região, com intensas rajadas de ventos e tempestades, houve a necessidade de facilitar o acesso de navios no interior da lagoa levando a construção de estruturas (guias-corrente) nas margens do canal. Inaugurada em 1915, essas estruturas, os molhes leste e oeste, viriam a estabilizar o canal da entrada, fixando a barra e impulsionando o crescimento da atividade portuária na região.

Atualmente, a área do porto organizado é constituída pelas instalações portuárias terrestres existentes na margem direita do canal do Norte desde o enraizamento do molhe oeste até a extremidade oeste do cais do Saneamento, incluindo o Porto Velho, o Porto Novo e a Quarta seção da Barra, além de todas as instalações localizadas nessas imediações (e.g piers, docas, armazéns, etc.). Ainda a infra-estrutura de proteção e acesso aquaviários compreendendo, além do Molhe Oeste e do Molhe Leste, as áreas de fundeio, bacias de evolução, canal de acesso e áreas adjacentes a esse, até as margens das instalações terrestres do Porto Organizado, conforme definidas anteriormente, existentes ou que venham a ser construídas e mantidas pela administração do Porto ou outro órgão do Poder Público.

O Porto de Rio Grande se interliga a todas as regiões do Estado do Rio Grande do Sul, através de ferrovias, sistema de navegação das Lagoas dos Patos e Mirim e seus rios tributários e das rodovias federais e estaduais, além de possuir ligação com os países vizinhos Argentina e Uruguai. O porto é responsável pelo transporte de cargas como: tanino, madeiras, máquinas agrícolas, lonas de freio, calçados, cutelaria, couro,

celulose, fumo, bobina, resina, autopartes além de possuir áreas para reparos e armazenamento de contêineres. (www.portoriogrande.com.br)

O assoreamento dos canais de navegação é um problema que afeta a grande maioria dos portos. Com a finalidade de reduzir os efeitos desse fenômeno é necessária uma compreensão mínima das condições hidrodinâmica e dos processos deposicionais responsáveis por ele.

Para que haja expansão da capacidade operacional, os portos necessitam investir em infra-estrutura para se tornarem competitivos. Isso significa melhorar as suas condições de navegabilidade aumentando o calado, e investir em métodos que possam auxiliar na redução das taxas de deposição nos canais e áreas de interesse do porto.

Os problemas de assoreamento na região do Porto Novo são históricos. A solução é a execução de dragagens periódicas que, além de causar impacto à coluna d'água, gera problemas para o descarte dessa carga de sedimentos e possui alto custo de execução.

O avanço computacional permite que modelos numéricos sejam utilizados para um prognóstico dessas modificações. Com resultados cada vez mais confiáveis, os modelos conseguem representar o comportamento hidrodinâmico local e a resposta desse as modificações no seu padrão de comportamento, portanto, são ferramentas importantes nas tomadas de decisão ao executar obras no ambiente.

De forma complementar aos estudos já desenvolvidos, o presente trabalho tem como foco, analisar as condições que controlam a deposição de sedimentos finos na área do Porto Novo de Rio Grande, bem como propor uma estrutura de ajuste de corrente (ou uma parede de deflexão) no canal da Ilha do Terrapleno como medida para reduzir as taxas de assoreamento nessa região.

2 – OBJETIVOS

Com a finalidade de gerar informações relevantes sobre a hidrodinâmica e processos morfológicos da região do Porto Novo de Rio Grande este trabalho tem como objetivos:

OBJETIVO GERAL

Analisar os fatores que controlam a hidrodinâmica e os processos deposicionais na região do Porto Novo por meios de modelagem numérica.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar o padrão da circulação na região do Porto Novo;
- Identificar as zonas de deposição do Porto Novo e analisar suas causas;
- Propor dentro do modelo, a construção de uma estrutura de ajuste de correntes e seu reflexo na hidrodinâmica e deposição de sedimentos atualmente observada na bacia do Porto Novo de Rio Grande.

3 – ÁREA DE ESTUDO

De acordo com Kjerfve (1994), uma lagoa costeira é um corpo d'água, normalmente orientado paralelo à costa, separado do oceano por uma barreira, conectado ao mesmo por um ou mais canais, e com profundidades que raramente ultrapassam alguns poucos metros. Esse ambiente pode ou não estar sujeito à mistura causada pela maré, e sua salinidade pode variar de água totalmente doce à hipersalina, dependendo das suas condições hidrológicas. As lagoas costeiras ocupam cerca de 13% da linha de costa do planeta (Nichols & Allen, 1981), e foram formadas como resultado da elevação do nível do mar durante o período Holoceno, há aproximadamente 11.500 anos . Elas podem ser classificadas como: estrangulada, vazada e restrita (Kjerfve, 1986).

3.1 – DESCRIÇÃO DA ÁREA

Localizada na planície costeira do Rio Grande do Sul, entre as latitudes 30° e 32°S e longitudes 50 e 52°W (Figura 2), a Lagoa dos Patos foi classificada como a maior laguna costeira do tipo estrangulado do mundo (Kjerfve,1986). A lagoa possui área superficial de 10.360 km², com 250 km de comprimento, 40 km de largura, e 5 m de profundidade média. O seu eixo principal está orientado na direção NE-SO. A Lagoa dos Patos está separada do Oceano Atlântico por um sistema de barreiras arenosas (Tomazelli & Dillemburg, 2007), e sua única conexão direta com a costa se dá através de um canal de aproximadamente 20 km de comprimento e menos de 1 km de largura. Indiretamente, a conexão é feita através de águas subterrâneas, onde a sua influência está associada às trocas hidroquímicas entre a lagoa e o substrato (Santos *et al*, 2008)

De acordo com Delaney (1965), o clima da região é do tipo subtropical úmido, com predomínio da massa tropical marítima. A temperatura média anual é de 22,9° C e a média pluviométrica está em torno de 1300 mm.

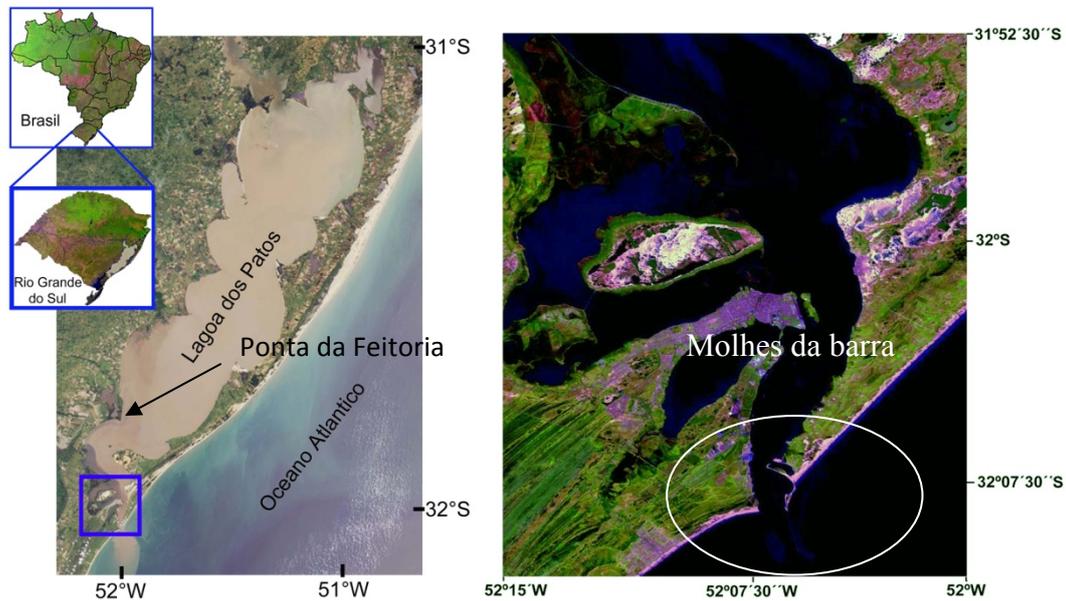


Figura 2: Localização da Lagoa dos Patos e seu estuário.

Devido às dimensões da Lagoa dos Patos, Delaney (1965) a dividiu geomorfologicamente em três regiões: 1) superior, que consiste da Lagoa do Casamento e da região próxima da foz do Rio Guaíba; 2) central, formada pela região entre a Feitoria e a Lagoa do Casamento, correspondendo a 80% da laguna (Asmus, 1997); e 3) inferior, compreendida entre foz da laguna e a Ponta da Feitoria, também chamada de zona estuarina, pois este é o limite mais freqüente de intrusão salina (Closs, 1962; Castello, 1985, Möller *et al*, 2001).

A porção central e a inferior são separadas por um degrau morfológico formado por bancos de areia situados ao redor da Ponta da Feitoria (Möller *et al*, 2001). A região estuarina (Figura 3) ocupa aproximadamente 10% da Lagoa dos Patos, e é caracterizada por um aumento exponencial da sua seção transversal com a distância da foz (Möller *et al*, 2001). Na porção estuarina é onde está localizado o complexo portuário da cidade de

Rio Grande e, portanto, as principais rotas de navegação. O principal é o canal de acesso com seções de 18, 16 e 14 m de profundidade desde a entrada do canal até o Porto Novo (Figura 4).



Figura 3: Região estuarina da Lagoa dos Patos.

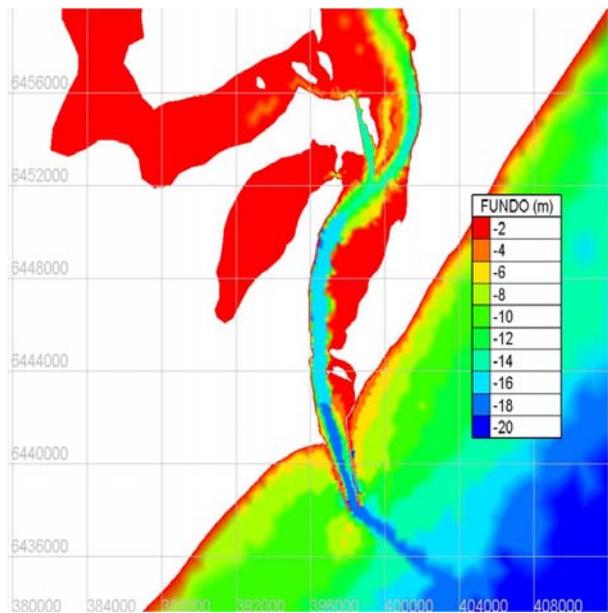


Figura 4: Batimetria da região estuarina da Lagoa dos Patos, incluindo o canal de acesso ao Porto Novo.

3.2 – CARACTERÍSTICAS SEDIMENTARES

Os sedimentos são conduzidos às lagoas costeiras através dos rios, correntes de marés, ventos e ondas (Möller, 1996; Kuijper *et al*, 2005; Winterwerp, 2005). Lagoas alimentadas por rios recebem sedimentos que variam de areia grossa à silte e argila. O material grosseiro é depositado à medida que a água do rio perde força ao penetrar na lagoa, para ser transportado para as praias lagunares e espalhado através da ação das ondas. O sedimento mais fino é progressivamente depositado no fundo da lagoa, reduzindo sua profundidade. A presença de água salgada promove a floculação e deposição do sedimento coesivo (e.g: silte, argila), por isso muitas lagoas apresentam uma transição de água doce turbida para salgada límpida em direção ao mar (Kjerfve, 1994).

As principais fontes de sedimentos para a Lagoa dos Patos são os rios Jacuí e Taquari, os principais afluentes do Rio Guaíba (Martins, 1963; Villwock, 1977). Outro contribuinte importante é o Rio Camaquã, que drena as terras baixas, a oeste da Lagoa dos Patos (Gonçalves, 2007).

A caracterização dos sedimentos de fundo da Lagoa dos Patos foi feita por Toldo Jr. (1994) (Figura 5). Sedimentos finos predominam no fundo lagunar, principalmente o silte. Alvares *et al* (1981) definiram que a sedimentação da parte norte a central apresenta variação textural com predominância do silte, que recobre os canais de navegação (de Itapoã a Ponta da Feitoria). Ao sul desse ponto, a influência da água costeira adjacente é observada, e os sedimentos de fundo passam gradativamente a silte argiloso, areia argilosa e siltica, e argila, através do processo de floculação, que faz com que esses sedimentos decantem. Na margem oeste, observam-se 5 fácies sedimentares entre areia grossa a fina, enquanto que na leste, encontram-se areias quartzosas maduras

e bem selecionadas (bem separadas dos componentes argilosos) oriundas de sistemas costeiros erosivos e deposicionais, ou seja, sofreram intemperismo em outro sítio e foram transportadas até a margem leste. Portanto, sedimentos finos são mais suscetíveis a sofrer e ressuspensão e deslocamento, permanecendo mais tempo na coluna d'água enquanto que os mais grosseiros se deslocam apenas no fundo ou sob a ação de ondas.

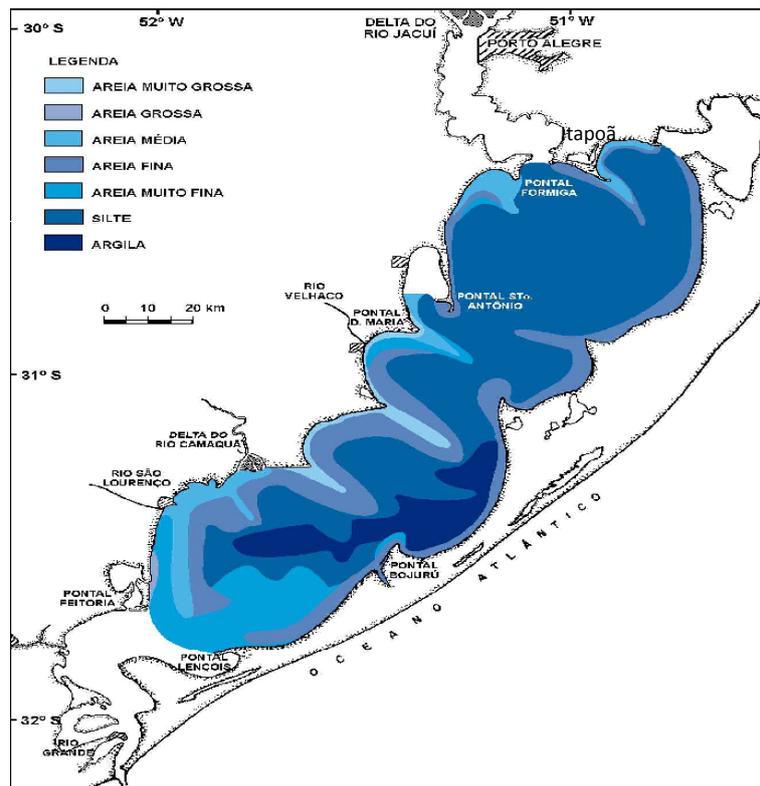


Figura 5: Sedimentos de fundo da Lagoa dos Patos (Toldo Jr, 1994).

Antiqueira e Calliari (2006) fizeram uma comparação entre as classes granulométricas e a batimetria, e chegaram à conclusão que os sedimentos arenosos são encontrados onde há maior atividade energética (ondas), retirando e impedindo a deposição de sedimentos finos. Já os sedimentos argilosos são encontrados na zona estuarina devido à ação da água do mar que penetra pelos molhes da barra, sendo a deposição desses sedimentos aceleradas pelo processo de floculação dos argilo-minerais e são encontrados em áreas protegidas e nos fundos dos canais (Calliari, 1980). Um

mapa textural (Figura 6) para a região estuarina foi configurado por Calliari (1980), obedecendo ao diagrama de Shepard (1960), que é baseado no conteúdo de areia, silte e argila. Esse mapa gerou a classificação de seis tipos de fácies texturais. Dentre essas fácies, podem-se destacar duas bem definidas: as arenosas, inerentes às regiões mais rasas e mais energéticas; e as argilo-sílticas, restritas aos fundos dos canais e as áreas protegidas.

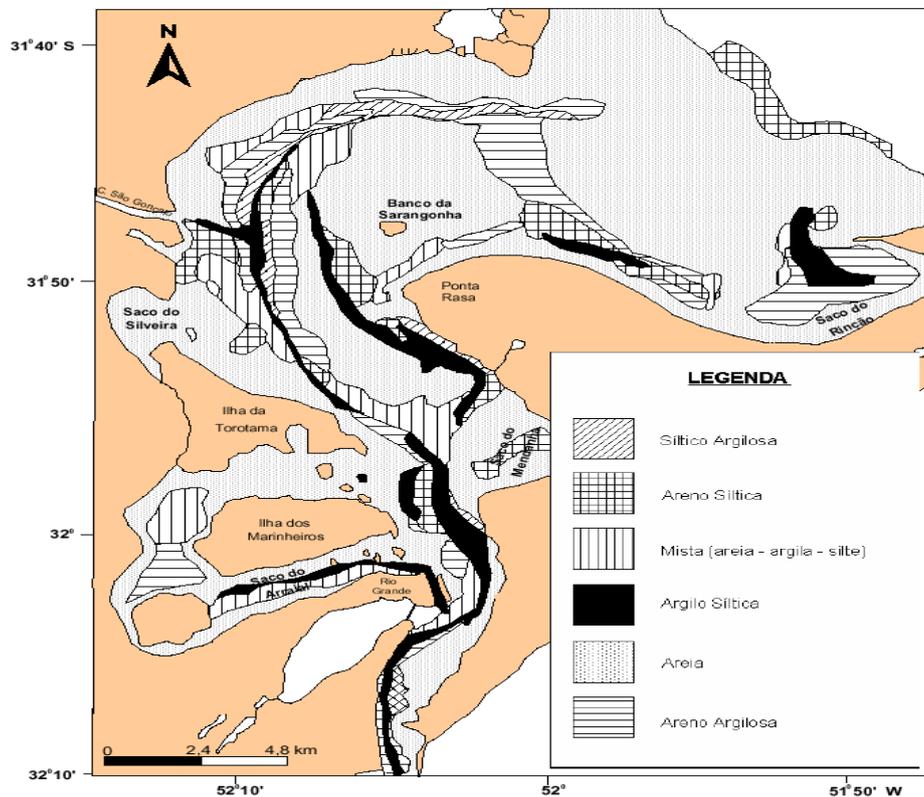


Figura 6: Diagrama Textural do estuário da Lagoa dos Patos.

Análises feitas para o EIA-RIMA do Porto de Rio Grande (Tagliani *et al*, 2001) mostraram a correlação inversamente proporcional entre a granulometria do sedimento e a profundidade (Tabela 2). A distribuição das classes sedimentares na região também foi analisada e é apresentada na Tabela 3.

Tabela 2: Distribuição percentual dos sedimentos por profundidade.

PROFUNDIDADE (m)	CASCALHO	AREIA	SILTE	ARGILA	AMOSTRAS
0 - 1	2.01	87.78	3.31	6.83	17
1 - 3	3.89	79.97	6.70	9.27	121
3 - 5	3.74	66.85	12.37	16.68	73
5 - 10	1.89	54.43	21.03	22.53	71
> 10	0.42	53.32	27.36	18.79	19

Tabela 3: Localização e tipo de fundo.

TIPO DE FUNDO	LOCAL DE OCORRÊNCIA
Arenoso	Margem lagunar e grandes bancos
Areno-siltica	Regiões adjacentes a margem lagunar e aos grandes bancos
Areno-argilosa	Parte externa dos canais e parte interna das enseadas
Misto (Areia+silte+argila)	Enseadas (sacos) e partes externas dos canais
Siltico-argiloso	Canais e adjacências
Argilo-siltico	Zonas mais profundas dos canais e regiões mais abrigadas (zonas internas dos sacos)

Martins (1963) definiu a distribuição de sedimentos entre os Molhes da Barra e o Porto Novo e encontrou cinco fácies: a zona externa aos molhes é coberta com areias, enquanto que os bancos consistem de silte arenoso. Esse sedimento arenoso penetra até as proximidades da 4ª Seção da Barra, junto ao molhe oeste, ainda marginado por silte arenoso. Deste ponto até o Saco da Mangueira encontram-se areia siltica. Do extremo sul do Saco da Mangueira até o Porto Novo, há uma mudança de silte-arenoso para silte-argiloso. Segundo o EIA/RIMA do Porto de Rio Grande (Tagliani *et al*, 2001), a presença de sedimentos lamosos na área de influência das atividades portuárias é responsável pelo assoreamento no canal de acesso, bacia de evolução e do canal do norte.

3.3 – CARACTERÍSTICAS HIDRODINÂMICAS

As mudanças da geomorfologia de uma laguna, pretéritas e atuais, são o resultado da ação hidrodinâmica associada a fenômenos meteorológicos característicos da região. Assim, lagoas costeiras estranguladas têm o vento como a sua principal forçante (Kjerfve & Magill, 1989), combinada com a descarga continental.

Os rios afluentes da Lagoa dos Patos (Figura 7) pertencem à região hidrográfica denominada Bacia Atlântica, e drenam uma área total de mais de 200.000 km², dividindo-se em dois grandes complexos formados por diversas sub-bacias. O maior destes é o Complexo Patos, formado pelos rios Vacacaí, Taquari, Jacuí, Caí, Sinos, Gravataí, Camaquã, Guaíba e arroios; possuindo uma área de drenagem de 150.432 km². O outro é o Complexo Mirim, formado pela Lagoa Mirim, pelos rios Jaguarão, Taquari, Cebolati, Piratini, Pelotas e pelos arroios Sarandi Grande, Santa Vitória, Rio Grande e Grande, e pelo Canal do São Gonçalo, que formam uma área de drenagem de 51.194 Km² (Vieira & Rangel, 1988).

As descargas dos rios apresentam um padrão de clima temperado de médias latitudes, onde as maiores descargas ocorrem no final do inverno e início da primavera, e as menores no outono e no verão, podendo ocorrer variações interanuais (Möller, 1996). A descarga do Rio Guaíba representa 84 % da contribuição de água continental para a lagoa (Herz, 1977). As descargas médias anuais dos rios Jacuí e Taquari são de 801 m³.s⁻¹ e 452 m³.s⁻¹, respectivamente (Vaz, 2003 apud. Marques, 2005), além do rio Camaquã e o canal São Gonçalo, sendo este último responsável pela comunicação entre a Lagoa Mirim e a Lagoa dos Patos.

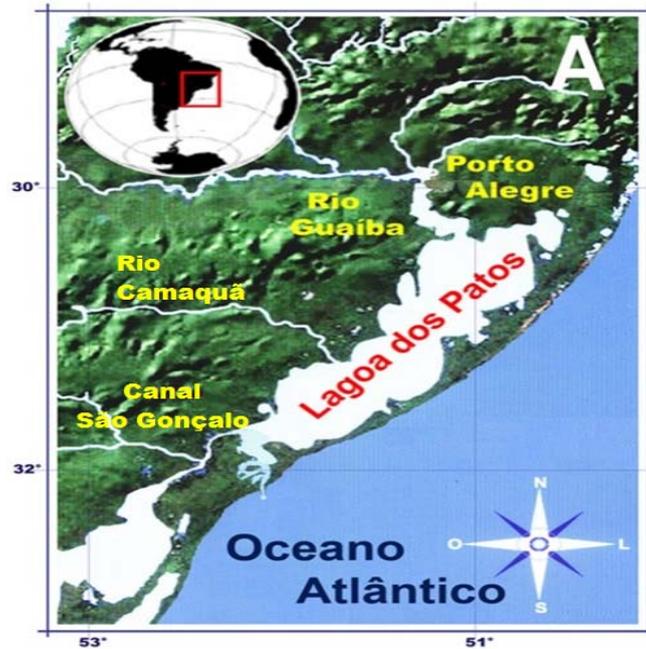


Figura 7: Rios afluentes da Lagoa dos Patos.

Fenômenos como o ENSO (EL NIÑO - SOUTHERN OSCILLATION) podem alterar drasticamente as condições de descarga na região sul do Brasil, promovendo o aumento da taxa de precipitação (Fernandes *et al*, 2002, Marques, 2009). Sob essas condições, o sedimento em suspensão pode não se depositar no interior da lagoa, sendo transportado para a região costeira (Calliari & Facchin, 1993; Marques, 2009) aonde irá se depositar. O regime de ventos na região litorânea do Rio Grande do Sul é dominado pelos ventos de nordeste (NE), oriundos do anticiclone do Atlântico Sul. Além desses, os ventos de sudoeste (SO) associados à passagem de frentes meteorológicas, oriundos do anticiclone Polar, são os principais controladores da circulação da Lagoa dos Patos. A passagem dessas frentes ocorre em intervalos de 3 a 17 dias (Möller, 1996), ocorrendo com mais frequência nos meses de inverno. Os ventos de NE chegam a 5 m.s^{-1} e os de SO chegam a 8 m.s^{-1} (Stech & Lorenzetti, 1992). A predominância dos ventos de NE, com ventos mais fortes entre setembro e abril, seguido pelos de SO, entre maio e outubro, também foi observada por Delaney (1965), Braga e Krushe (2000), e Lages (2003).

Segundo Möller *et al* (2001), o vento controla a circulação da Lagoa dos Patos através dos seus efeitos local e não-local (remoto): o primeiro está associado com as oscilações estacionárias dentro da laguna, nas porções norte e central. O segundo efeito é causado pelo mecanismo de transporte de Ekman e atua a 90° à esquerda do vento. O efeito local dos ventos de NE faz com que diminua o nível da água da laguna na porção norte, acumulando água na região da Feitoria (Figura 8), enquanto que o efeito remoto do vento reduz o nível da água na desembocadura. Os dois efeitos somados provocam um gradiente de pressão barotrópico em direção ao oceano. Já o efeito local dos ventos de SO aumenta o nível da água na porção norte e diminui na Feitoria, e o remoto empilha água nas proximidades da desembocadura, forçando um gradiente de pressão para dentro do estuário, favorecendo a entrada de água salgada. Esse mecanismo é o principal agente de trocas de água entre a laguna e a zona costeira (Fernandes *et al*, 2002; Möller *et al*, 2001).

Em lagoas estranguladas como a Lagoa dos Patos, o efeito da maré fica confinado na entrada do canal (Kjerfve, 1986). A amplitude tem média de 0,47 m próximo à entrada do canal, e a maré é considerada do tipo mista, principalmente diurna. Segundo Garcia (1997), essa baixa amplitude ocorre devido a um ponto anfidrômico localizado fora da costa de Rio Grande. A maré na região tem a componentes O_1 (lunar principal, 11 cm), como a sua principal constituinte (Fernandes *et al*, 2004). A desembocadura age como uma espécie de filtro que atenua a onda de maré (Möller *et al*, 2001, Fernandes *et al*, 2004), e promove a sua atenuação ao longo do canal (Möller *et al.*, 2001, Knoppers & Kjerfve, 1999), agindo da mesma maneira com as ondas de longo período (Fernandes *et al.*, 2004). Em função dessas características, a maré astronômica não exerce influência no transporte sedimentar da lagoa, segundo os resultados dos modelos numéricos TELEMAC2D e SEDIMORPH(Gonçalves, 2007). Sendo assim, a maré

meteorológica, causada pela elevação do nível da água devido à passagem de frentes frias, é mais importante para o transporte de sedimentos do que a própria maré astronômica.

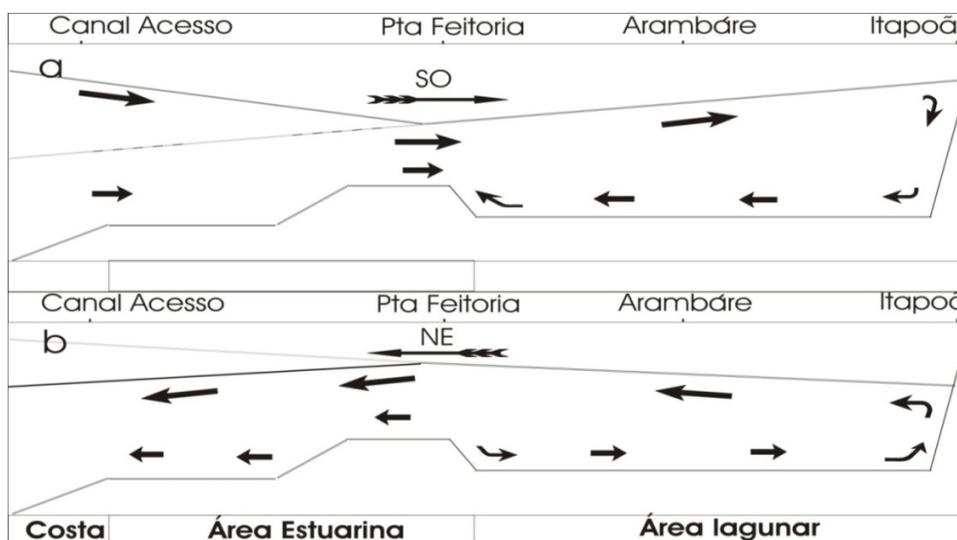


Figura 8: Representação esquemática dos níveis de elevação devido à resultante da ação local e remota do vento. Modificado de Möller et al (2001).

A região estuarina da Lagoa dos Patos, situada entre a desembocadura da lagoa até a Ponta da Feitoria, tem nas descargas dos rios e na atuação dos ventos suas principais forçantes da circulação estuarina. Nessa região, os ciclos de estratificação e desestratificação dependem da força relativa da circulação barotrópica dessas duas forçantes. Em períodos de alta descarga ($> 4000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) a zona de mistura é transferida totalmente para a plataforma continental adjacente (Möller, 2001).

A ação dos ventos de SO é responsável pelo fluxo de entrada das águas da plataforma na região estuarina (Möller, 2001). O transporte de sal depende da intensidade da descarga fluvial que chega até a lagoa durante o ano. Segundo Möller & Castaing (1999), a lagoa pode apresentar características de estuários de cunha salina a bem misturado, o que foi posteriormente confirmado com dados de modelos numéricos tridimensionais (Fernandes *et al.*, 2005).

4 – MATERIAL E MÉTODOS

O estudo das características hidrodinâmicas, deposicionais e erosivas da região do canal do Porto Novo foi realizado com base em técnicas de modelagem numérica, através da aplicação de um modelo hidrodinâmico (TELEMAC2D) e um modelo de morfológico (transporte de sedimento + variação batimétrica), SediMorph. O período simulado foi de 365 dias, e foram utilizados dados do ano de 2002 de forma a analisar a resposta das características sedimentares durante um ciclo anual.

O TELEMAC2D foi desenvolvido pela ©EDF - *Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement*, da companhia *Electricité de France* (EDF). O modelo de transporte de sedimento utilizado foi o SediMorph, desenvolvido pelo *Federal Waterways Engineering and Research Institute*, da Universidade das Forças Armadas de Munique, e pelo *Institute für Wasserwesen*.

O esquema de acoplamento entre os dois modelos está esquematizado na figura 9:

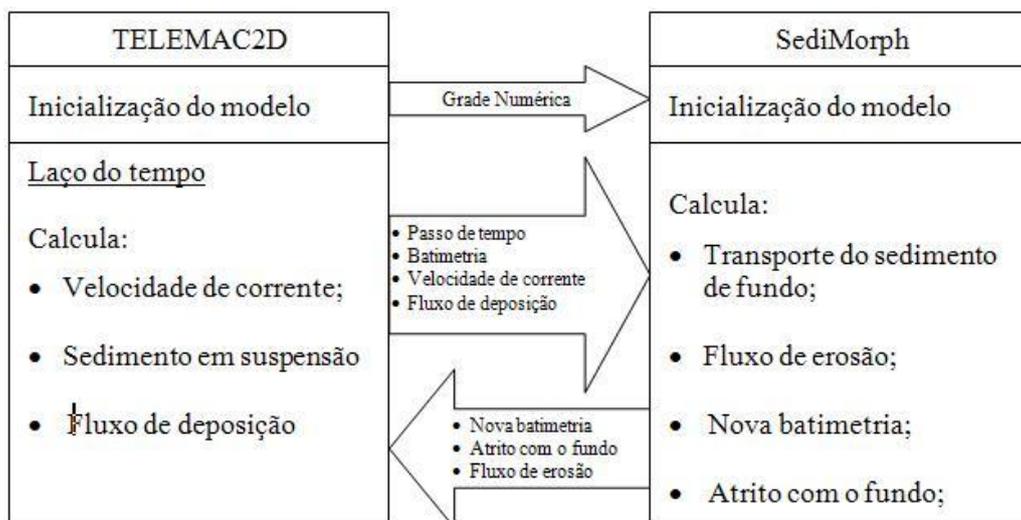


Figura 9: Acoplamento entre o TELEMAC2D e o SediMorph. (Gonçalves, 2007).

4.1 – O MODELO TELEMACH2D

O modelo TELEMACH2D utiliza a técnica de elementos finitos para resolver as equações de fluxo de superfície livre integradas na vertical, conhecidas como equações de Barré de Saint-Venant, as quais são resolvidas em um sistema de coordenadas cartesiano, onde x e y formam o plano horizontal, com a gravidade agindo ortogonalmente a esse plano. A grade batimétrica é representada por triângulos de diferentes tamanhos, e sua resolução é em função das variações batimétricas. A maior densidade dos triângulos é encontrada em regiões onde é necessário maior detalhamento do fundo.

O sistema que o modelo resolve é composto pelas seguintes equações:

-Equação da Continuidade

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{u}\vec{\nabla}(h) + h\text{div}(\vec{u}) = S_h \quad (1)$$

- Equação de conservação de momento no eixo x

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{u}\vec{\nabla}(u) = -g\frac{\partial \eta}{\partial x} + S_x + \frac{1}{h}\text{div}(hve\vec{\nabla}u) \quad (2)$$

-- Equação de conservação de momento no eixo y

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{u}\vec{\nabla}(v) = -g\frac{\partial \eta}{\partial y} + S_y + \frac{1}{h}\text{div}(hve\vec{\nabla}v) \quad (3)$$

Onde:

t tempo (s)

u, v componentes da velocidade integradas na vertical ($m \cdot s^{-1}$)

η elevação da superfície livre (m)

H profundidade (m)

g aceleração da gravidade ($m \cdot s^{-2}$)

ν_e coeficiente de difusividade turbulenta ($m^2 \cdot s^{-1}$)

S_h termo fonte para a equação da continuidade ($m \cdot s^{-1}$)

S_x e S_y termos fonte para as equações de conservação de momento, representando a tensão de cisalhamento do vento, a força de Coriolis e o atrito com o fundo.

- A força de Coriolis é calculada pelas seguintes equações:

$$\mathbf{f} = \vec{\omega} \times \sin \phi \quad (4)$$

$$\overrightarrow{Scx} = f\mathbf{v} \quad (5)$$

$$\overrightarrow{Scy} = -f\mathbf{u} \quad (6)$$

Onde:

\overrightarrow{Scx} e \overrightarrow{Scy} vetor da força de Coriolis (N)

f parâmetro de Coriolis (rad s^{-1})

$\vec{\omega}$ velocidade angular da Terra (rad s^{-1})

ϕ latitude do fluido (rad)

O cisalhamento com o vento é calculado pelas seguintes fórmulas:

$$S_x = \frac{1}{h} \frac{\rho_{ar}}{\rho} a_{vento} u_{vento} \sqrt{u_{vento}^2 + v_{vento}^2} \quad (7)$$

$$S_y = \frac{1}{h} \frac{\rho_{ar}}{\rho} a_{vento} v_{vento} \sqrt{u_{vento}^2 + v_{vento}^2} \quad (8)$$

Onde:

u_{vento} componente zonal da velocidade do vento ($m s^{-1}$)

v_{vento} componente meridional da velocidade do vento ($m s^{-1}$)

a_{vento} coeficiente de resistência do vento (adimensional)

ρ_{ar} densidade do ar ($1,023 kg.m^3$)

O coeficiente de resistência do vento a_{vento} , é calculado pelo TELEMAC2D através da fórmula proposta pelo *Institute of Oceanographic Sciences* (Reino Unido):

* Se $|\overrightarrow{u_{vento}}| < 5 m s^{-1}$ então $a_{vento} = 0,565 \cdot 10^{-3}$

** Se $5 < |\overrightarrow{u_{vento}}| < 19,22 m s^{-1}$ então $a_{vento} = (0 - 0,12 + 0,137|\overrightarrow{u_{vento}}|) \cdot 10^{-3}$

*** Se $|\overrightarrow{u_{vento}}| > 19,22 m s^{-1}$ então $a_{vento} = 2,513 \cdot 10^{-3}$

A salinidade e o transporte de sedimento em suspensão são calculados pelo TELEMAC2D, ambos como traçadores passivos.

A salinidade é calculada através da equação de conservação da massa:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \vec{\nabla}(T) = \frac{1}{h} div(hv_T) \frac{\partial}{\partial x} (hv_T \vec{\nabla} T) + S_T \quad (9)$$

Onde:

T concentração do traçador (kg. m^{-3})

S_T termo fonte para traçador ($\text{g.l}^{-1}.\text{s}^{-1}$)

v_T coeficiente de difusão do traçador ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)

Assume-se no modelo que o sedimento em suspensão, além de ser um traçador passivo, não influencia na densidade do fluido e é resolvido pela seguinte fórmula:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \vec{u} \vec{\nabla}(\bar{c}) = \frac{1}{h} \text{div}(h v_c) \frac{\partial}{\partial x} (h v_c \vec{\nabla} \bar{c}) + S_c + (\Phi_{dep} + \Phi_{ero}) \quad (10)$$

Onde:

\bar{c} concentração média de sedimento na coluna d'água (kg.m^{-3})

S_T termo fonte para sedimento (kg.m^{-3})

v_c coeficiente de difusão do sedimento ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$)

Φ_{dep} fluxos de deposição do sedimento ($\text{kg.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$)

Φ_{ero} fluxos de erosão do sedimento ($\text{kg.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$)

O fluxo de erosão Φ_{ero} é calculado pelo SediMorph. O fluxo de deposição Φ_{dep} é calculado pelo TELEMAC2D de acordo com Krone (1962):

$$\Phi_{dep} = \begin{cases} w_c c_B \left(1 - \frac{\tau_B}{\tau_{cd}}\right) & \text{for } \tau_B < \tau_{cd} \\ 0 & \text{for } \tau_B \geq \tau_{cd} \end{cases} \quad (11)$$

Onde:

w_c	velocidade de sedimentação (m.s^{-1})
τ_B	tensão de cisalhamento no fundo (N.m^{-2})
τ_{cd}	cisalhamento crítico para deposição (N.m^{-2})
c_B	concentração de sedimento próximo ao fundo (kg.m^{-3})

4.2– APROXIMAÇÕES ASSUMIDAS PELO TELEMAC2D

4.2.1 – Equilíbrio Hidrostático – O TELEMAC2D assume que a força do gradiente de pressão e a força gravitacional estão em equilíbrio, não havendo força resultante na vertical.

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial y}{\partial x} - g = 0 \quad (12)$$

4.2.2 – Incompressibilidade do fluido – As variações de densidade causadas pela compressão do fluido são desprezíveis. Em outras palavras, as variações locais e advectivas de ρ são nulas:

$$\frac{d\rho}{dt} = 0 \quad (13)$$

4.2.3 – Impermeabilidade da superfície e do fundo – O modelo assume que não há transferência de água (fluxo) com o fundo e com a superfície.

4.3 – MODELAGEM DA TURBULÊNCIA

Na formulação apresentada são adicionados os termos de atrito de Reynolds, que representam o atrito interno provocado por flutuações na velocidade sobre sua média (Hervouet & Van Haren, 1996). Com isso, o sistema de equações resultante passa a ser

indeterminado por apresentar mais incógnitas que equações, sendo necessário que os termos adicionados sejam parametrizados. Isso é feito através de modelos de fechamento turbulento. As simulações feitas nesse trabalho utilizaram o modelo de Smagorinsky.

4.4 – O MODELO SEDIMORPH

O modelo matemático SediMorph é um modelo morfodinâmico e de transporte em suspensão que simula o movimento de diferentes classes de grãos. (www.baw.de/vip/en/departments/departament_k/methods/hnm/sedimorph/index.html),

Os processos físicos que o modelo calcula são:

- a. O atrito entre o fluxo e o fundo, levando em consideração a rugosidade e granulometria dos depósitos sedimentares.
- b. A capacidade do transporte de sedimento de fundo
- c. O fluxo de erosão
- d. A evolução do fundo

O SediMorph utiliza um arquivo para definir as classes sedimentares (SCF), caracterizadas pelo diâmetro e a densidade de cada uma. Através deste arquivo, é gerada uma grade ortogonal não - estruturada de fundo. O domínio a ser modelado é coberto por uma grade que consiste de um conjunto de polígonos não-coincidentes entre triângulos e quadriláteros, ou seja, uma malha bidimensional não - estruturada com diversos níveis na vertical, formando assim uma grade de volumes finitos.

A fração do volume de cada classe de sedimento especificada no arquivo SCF deve ser definida para cada elemento da grade. A estrutura da malha está apresentada na figura 10. A camada de interface (*exchange layer*) é onde ocorrem os fluxos de erosão e

deposição. Cada camada vertical pode apresentar distribuição sedimentar diferente. Apesar disso, nesse trabalho está sendo utilizada apenas uma camada, devido à carência de dados de distribuição vertical dos sedimentos na região. A camada rígida (*rigid layer*) é o limite vertical da malha, onde não podem mais ocorrer processos erosivos.

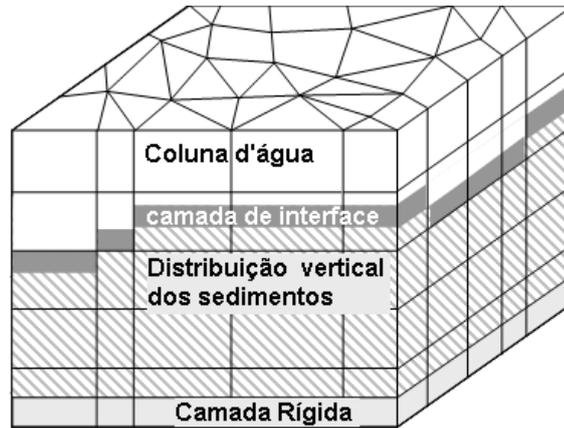


Figura 10: Estrutura da malha de volumes finitos do SediMorph (adaptado de Malcherek et al 2005).

4.4.1 – CÁLCULO DA TENSÃO COM O FUNDO (τ_B)

A tensão com o fundo é calculado de acordo com Nikuradse (1933), por:

$$\vec{\tau}_B = \frac{\rho \kappa^2}{\left(\ln \frac{12h'}{k_s}\right)^2} \|\vec{u}'\| \vec{u}' = 0 \quad \text{para } 0 < k_s \ll h \quad (14)$$

Onde:

h' altura de referência sobre o fundo, que em um modelo 2D é tido como a profundidade total (m)

\vec{u}' velocidade média do fluxo sobre a profundidade de referência (m.s^{-1})

κ constante de von Karman

k_s coeficiente de rugosidade efetiva de Nikuradse

ρ densidade da água (kg.m^{-3})

4.4.2 – CÁLCULO DA CAPACIDADE DE TRANSPORTE DE SEDIMENTO DE FUNDO

A capacidade de transporte de sedimento de fundo (q_s) é o fluxo potencial de sedimento de fundo por unidade de comprimento ($\text{m}^3.\text{m}^{-1}.\text{s}^{-1}$). Dentre as diferentes fórmulas disponibilizadas no SediMorph, foi selecionada para este trabalho a formulação de van Rijn (1985). Este modelo foi escolhido baseado nos testes de sensibilidade de Gonçalves (2007) que mostraram bons resultados:

$$q_s = \alpha \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d_{50}^3} D_*^{-0.3} T^\beta \quad (15)$$

Com:

$$T = \frac{\tau_B - \tau_c}{\tau_c} \quad (16)$$

Onde:

T é o parâmetro adimensional de atrito com o fundo.

Quando $T \leq 3$, os parâmetros $\alpha = 0,053$ e $\beta = 2,1$ aplicados, e se $T > 3$, os parâmetros $\alpha = 0,1$ e $\beta = 1,5$ são aplicados.

D_* é o parâmetro adimensional de grão, dado por:

$$D_* = \left(\frac{(\rho_s - \rho) g}{\rho v^2} \right)^{\frac{1}{3}} d_{50} \quad (17)$$

Onde:

τ_B atrito com o fundo ($N.m^{-2}$)

ρ densidade da água ($kg.m^{-3}$)

ρ_S densidade do sedimento ($kg.m^{-3}$)

d_{50} diâmetro correspondente a 50% dos sedimentos no ponto de interesse (mm)

τ_c estresse crítico de Shields para o início do movimento do sedimento, calculado por:

$$\tau_c = \theta_c(\rho_S - \rho)gd_{50} \quad (18)$$

Onde:

θ_c Parâmetro de Shields

O fluxo de sedimento \overline{qs} é assumido como paralelo ao vetor do atrito com o fundo, sendo calculado a partir da capacidade de transporte de sedimento:

$$\overline{qs} = qs \frac{\overline{\tau_B}}{\|\overline{\tau_B}\|} \quad (19)$$

4.4.3 – CÁLCULO DO FLUXO DE EROSÃO (Φ_{ero})

O fluxo de erosão (Φ_{ero}) é calculado de acordo com a formulação de Partheniades (1965):

$$\Phi_{ero} = \begin{cases} M_{ero} \left(\frac{\tau_B}{\tau_{ce}} - 1 \right) & \text{for } \tau_B \geq \tau_{ce} \\ 0 & \text{for } \tau_B < \tau_{ce} \end{cases} \quad (20)$$

Onde

M_{ero} coeficiente de erosão ($\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)

τ_{ce} cisalhamento crítico de erosão (N.m^{-2})

4.4.4 – CÁLCULO DA EVOLUÇÃO DO FUNDO

A evolução do fundo é calculada através da seguinte equação:

$$(1 - n) \frac{\partial z_B}{\partial t} + \text{div} \vec{q}_s = \frac{\Phi_s}{\rho_s} \quad (21)$$

Onde

z_B coordenada vertical da camada superficial de sedimento

n porosidade da camada superficial de sedimento (adimensional)

Φ_s fluxo de sedimento ($\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) entre a coluna d'água e o fundo, calculado por

$$\Phi_s = \Phi_{ero} + \Phi_{dep} \quad (22)$$

\vec{q}_s taxa de transporte de sedimento ($\text{m}^3.\text{m}^{-1}.\text{s}^{-1}$), calculada por:

$$\vec{q}_s = q_s \frac{\vec{\tau}_B}{\|\vec{\tau}_B\|} \quad (23)$$

4.5 – CONSTRUÇÃO DA GRADE NUMÉRICA

4.5.1 – DADOS BATIMÉTRICOS

A geração da grade batimétrica foi a primeira etapa da execução do trabalho. Foram utilizados dados batimétricos referentes à Lagoa dos Patos, à região estuarina e à região costeira adjacente. Os dados referentes à Lagoa dos Patos foram retirados da Carta Náutica 2140, da DHN (Diretoria de Hidrografia e Navegação). Para representar a região estuarina, foram utilizadas as seguintes cartas náuticas da DHN:

- Carta 2101 (Porto de Rio Grande);
- Carta 2102 (De São José do Norte ao canal da Setia);
- Carta 2103 (Da barra do Canal São Gonçalo às Porteiras);
- Carta 2106 (Saco do Rincão e proximidades).

Foram ainda utilizados dados batimétricos da região do canal de acesso coletados pela Superintendência do Porto de Rio Grande (SUPRG).

Para a região costeira, foram utilizados dados das seguintes cartas náuticas da DHN:

- Carta D0031 (de Rio Grande, RS, ao Rio da Prata);
- Carta D0090 (de Paranaguá ao Rio da Prata);
- Carta D1900 (de Florianópolis a Torres);
- Carta D2000 (de Torres a Mostardas).

Os dados para a região costeira foram complementados com um levantamento batimétrico realizado pela Marinha do Brasil durante o projeto Levantamento da Plataforma Continental Brasileira (LEPLAC).

4.5.2. GRADE BATIMÉTRICA

A grade batimétrica gerada a partir dos dados descritos anteriormente apresenta um total de 21466 elementos triangulares e 11489 nós (Figura 11A), abrangendo toda a Lagoa dos Patos (Figura 11B) e uma porção da região costeira, que se estende entre as latitudes 28°S (Florianópolis - SC) e 36°S (Punta del Este, Uruguai) até aproximadamente a isóbata de 3500 m. A malha possui esse tamanho devido à disponibilidade de dados utilizados para as condições de contorno oceânicas serem obtidos de um modelo global.

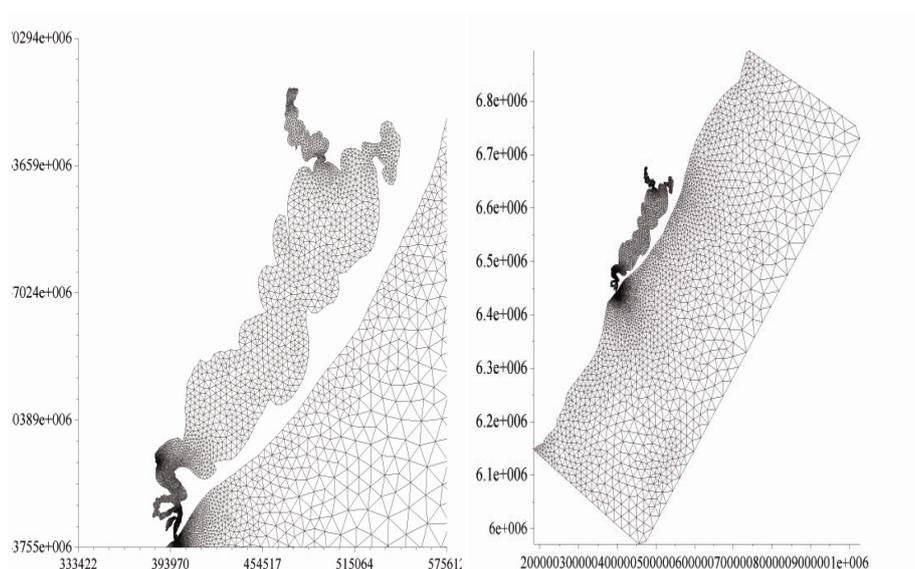


Figura 11: (A) Malha total usada na simulação (B) Região da Lagoa dos Patos.

A região do Porto Novo recebeu um refino maior com a finalidade de obter maior resolução, principalmente no canal (Figura 12) que é responsável pela visualização mais detalhada das condições hidrodinâmicas de micro escala, que possuem alta variabilidade em magnitude e direção, atuando na sedimentação na região do porto. A geração da grade do domínio foi feita através do software MATISSE, que cria a grade de elementos finitos e interpola e gera os dados batimétricos (Figura13).

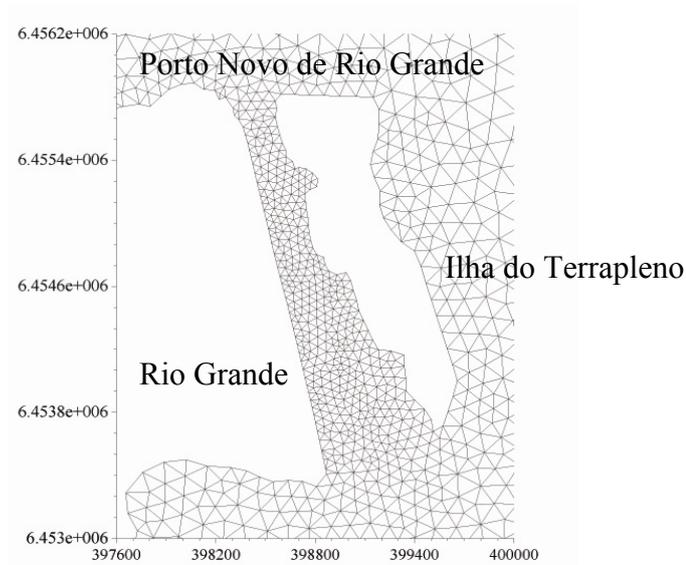


Figura 12: Refino da malha na área do Porto Novo.

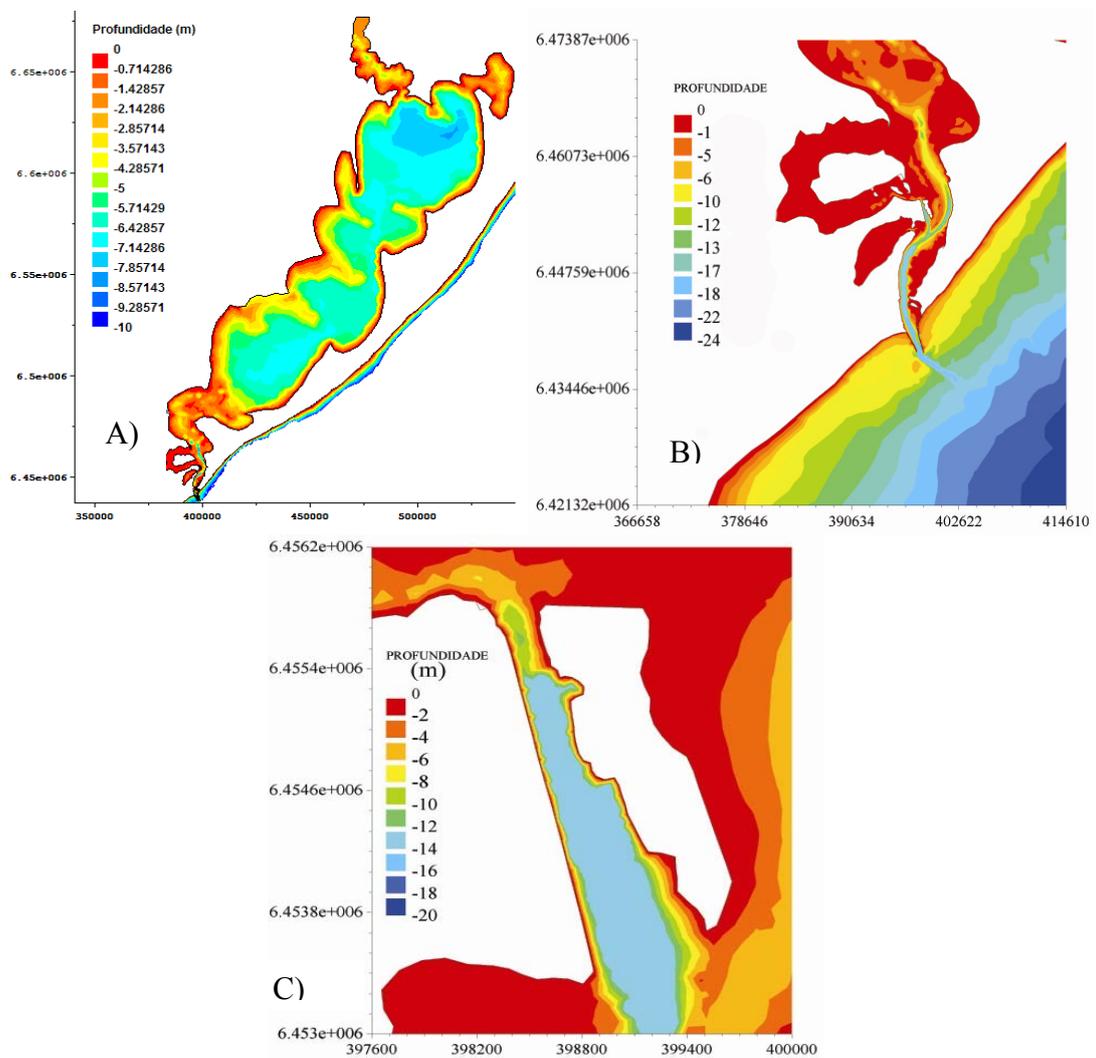


Figura 13: Representação da batimetria na Lagoa dos Patos (A) e detalhe da região estuarina (B) e na Região do Porto Novo (C).

4.6 – CONDIÇÕES DE CONTORNO DO MODELO HIDRODINÂMICO

4.6.1 – FRONTEIRA OCEÂNICA

A fronteira oceânica foi forçada com dados de maré variáveis no tempo e no espaço (Figura 14). Foram utilizados dados de amplitude e fase das cinco principais constituintes de maré mais significativas da região (K_1 , M_2 , N_2 , O_1 e S_2), extraídos do modelo global de maré *Grenoble Model* (FES95.2), com resolução espacial de 50 km. Antes de serem prescritos na fronteira oceânica da malha, os dados foram interpolados linearmente para uma grade com resolução de 1 km.

4.6.2 – FRONTEIRA CONTINENTAL

Nos contornos abertos continentais, localizados na foz do rio Camaquã e no delta do rio Jacuí (Figura 14), foram utilizados dados de descarga fluvial extraídos da página da Agência Nacional das Águas (ANA) (www.ana.gov.br), (Figura 15) para o ano de 2002. Para o canal São Gonçalo, devido à falta de dados, utilizou-se a média de $500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

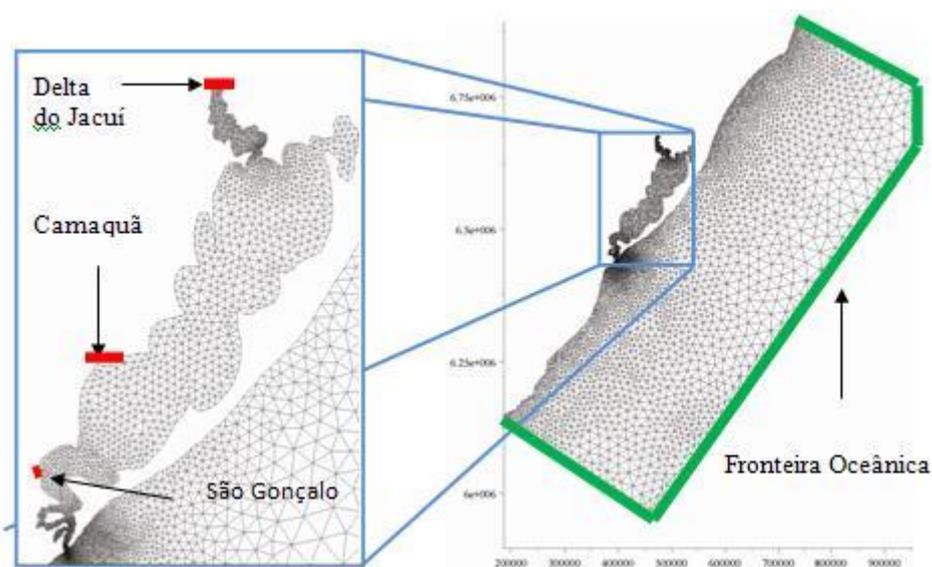


Figura 14: Contornos líquidos da grade.

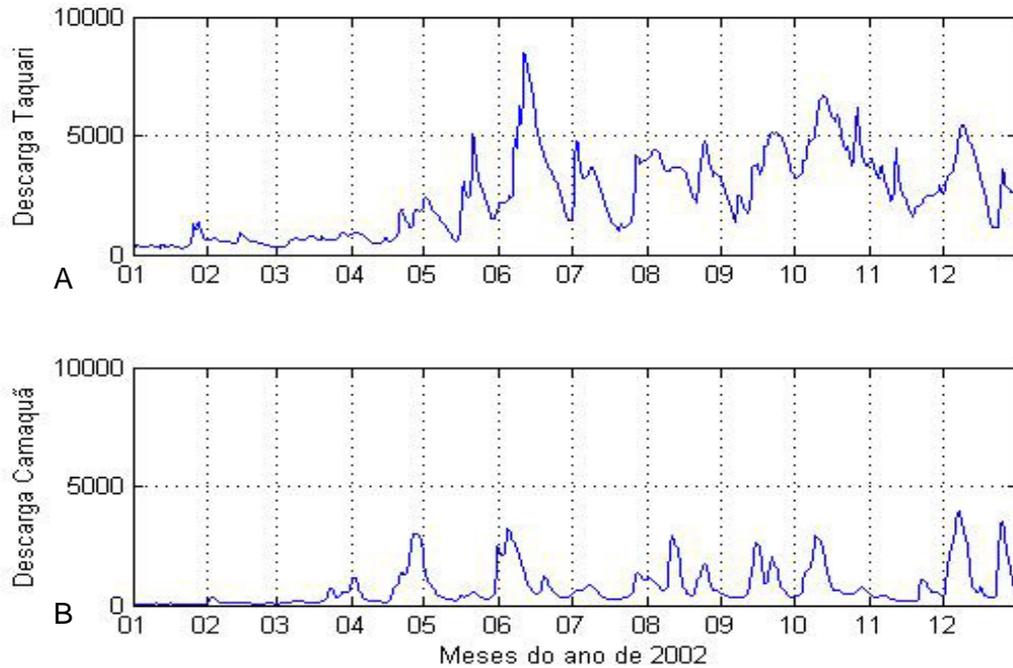


Figura 15: Soma das descargas dos rios Jacuí e Taquari (A), utilizados na fronteira do delta do Jacuí, e descarga do rio Camaquã (B), em $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, referentes ao ano de 2002.

4.6.3 - CONTORNO SUPERFICIAL

Na condição de contorno superficial, foram utilizados dados de vento variando no tempo e no espaço, extraídos do site da *National Oceanic & Atmospheric Administration* (NOAA) (www.cdc.noaa.gov/cdc/reanalysis). Monteiro (2007) realizou um estudo de validação desses dados para a área de estudo, e seus resultados mostram que esses dados representam a circulação atmosférica da região de forma satisfatória.

Os dados foram extraídos para a região entre as latitudes 25°S e 38°S , e entre as longitudes 42°W e 52°W , com uma resolução espacial de 111 km e resolução temporal de 6 horas. Depois de extraídos, os dados foram interpolados para uma grade com resolução espacial de 1 km, sendo então prescritos para cada ponto da malha de elementos finitos.

4.7 – CONDIÇÕES INICIAIS DO MODELO MORFODINÂMICO

As condições iniciais do modelo SediMorph foram estabelecidas com base numa distribuição sedimentar inicial dos diferentes tipos de fundo, sendo constante na vertical, devido a falta de dados disponíveis sobre a distribuição vertical dos sedimentos.

A distribuição horizontal dos sedimentos da Lagoa dos Patos seguiu os dados coletados durante o Projeto Lagoa (Furg), entre os anos de 1975 e 1979, com concentração de pontos amostrais na região estuarina da Lagoa dos Patos. Para o restante da Lagoa, foi feita uma distribuição baseada no mapa textural apresentado por Toldo Jr (1994), obedecendo a uma distribuição em três classes granulométricas: silte (Figura 16), areia fina (Figura 17) e areia grossa (Figura 18). As Figuras 19, 20 e 21 apresentam a distribuição granulométrica da região do Porto Novo em maior detalhe.

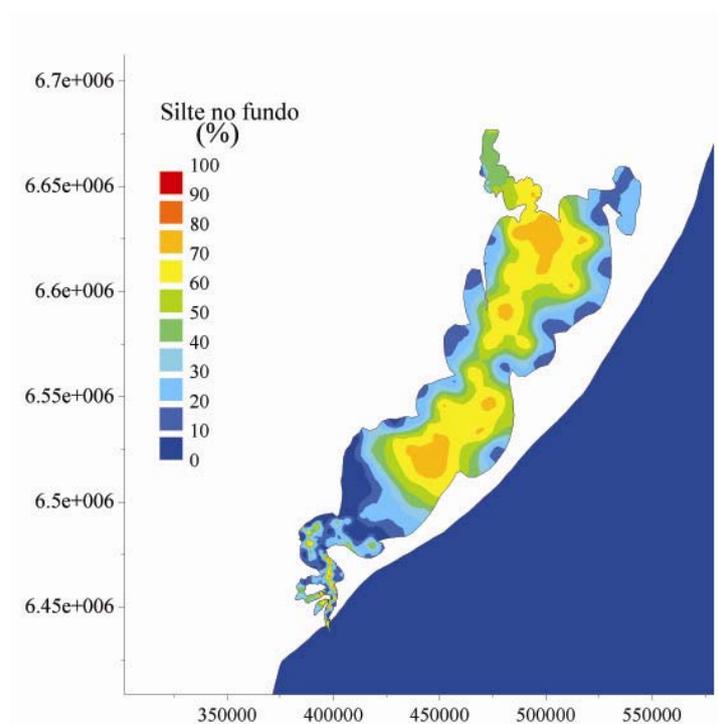


Figura 16: Distribuição inicial de silte no fundo na Lagoa dos Patos.

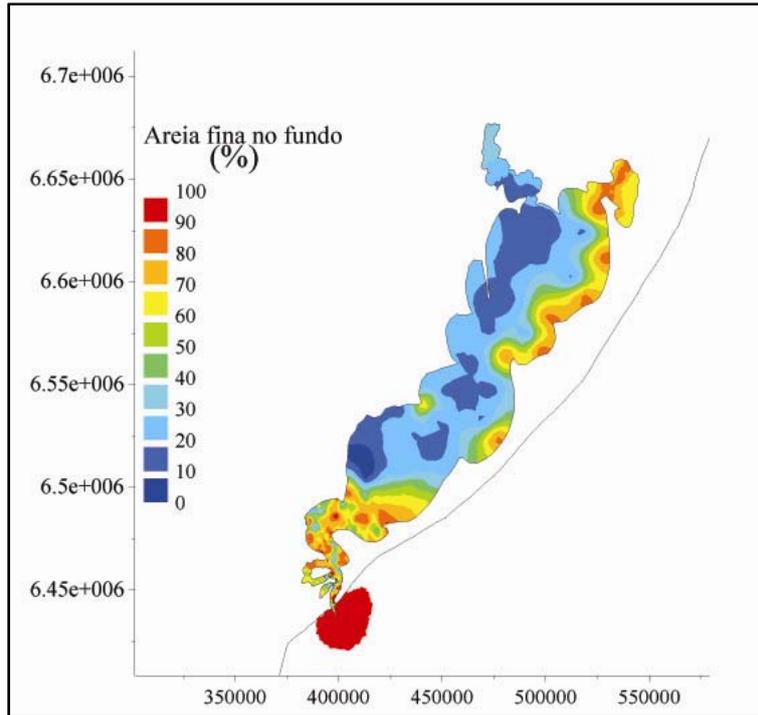


Figura 17: Distribuição inicial de areia fina no fundo na Lagoa dos Patos.

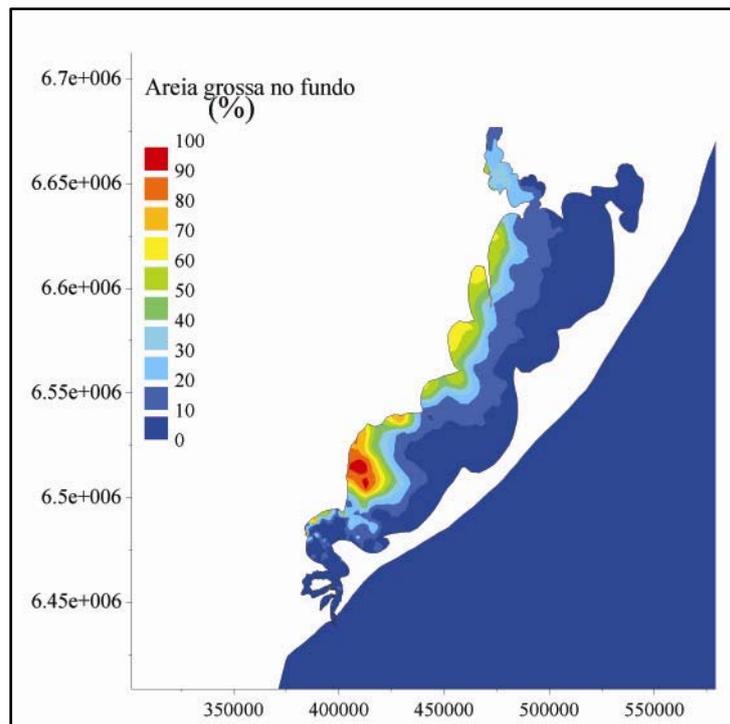


Figura 18: Distribuição inicial de areia grossa na Lagoa dos Patos.

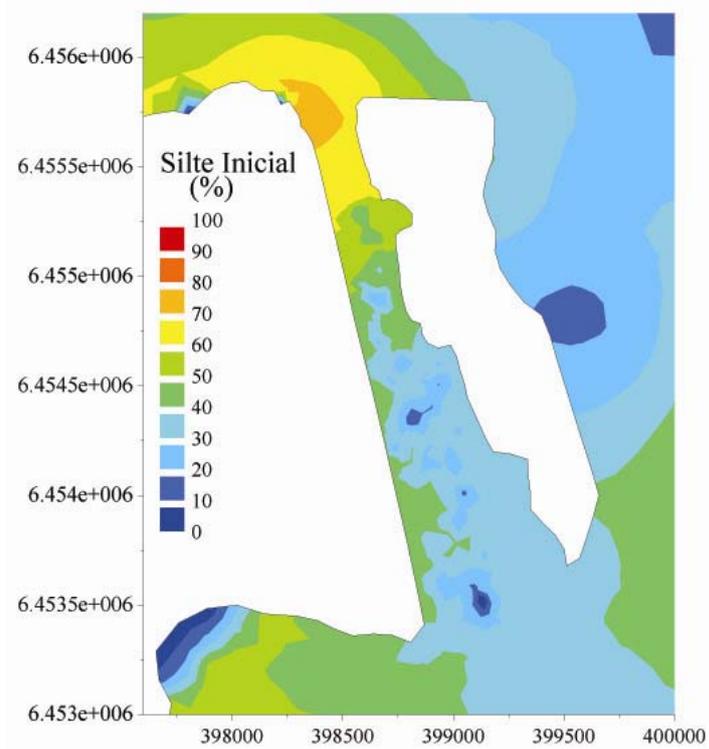


Figura 19: Distribuição inicial de silte no Porto Novo.

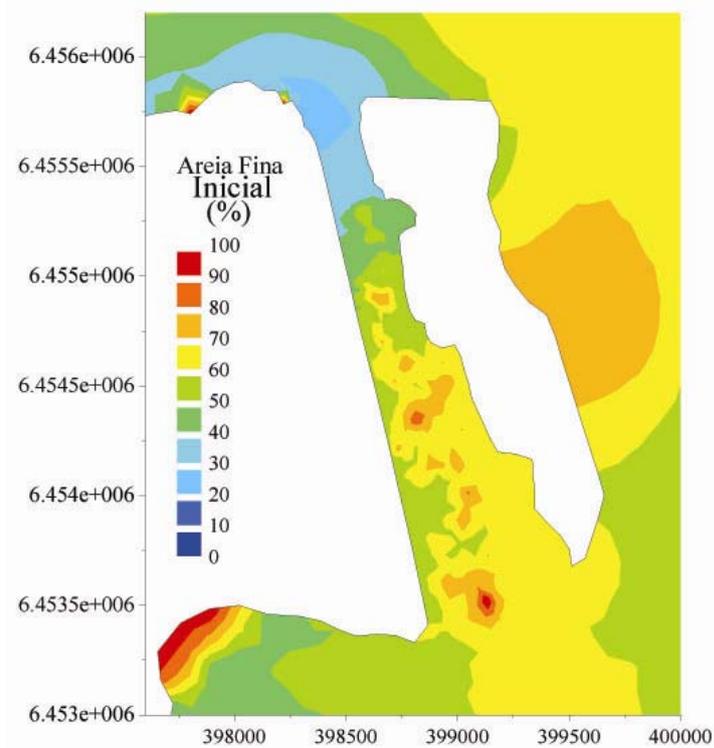


Figura 20: Distribuição inicial de areia fina no Porto Novo.

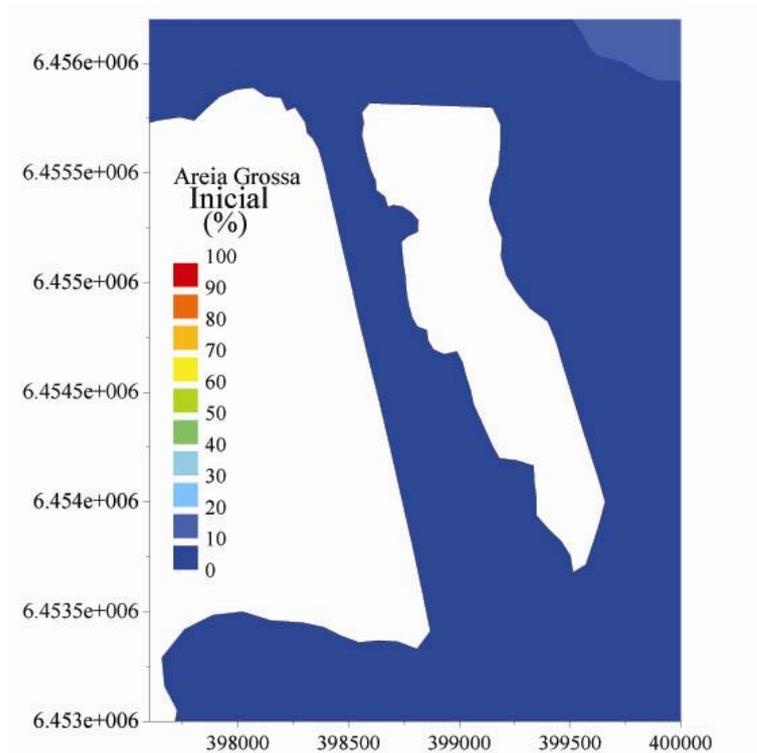


Figura 21: Distribuição inicial de areia grossa no fundo no Porto Novo.

4.8 – PARÂMETROS FÍSICOS UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES HIDRO E MORFODINÂMICA

Os parâmetros físicos utilizados pelo TELEMAC2D foram estabelecidos de acordo com os diversos trabalhos realizados com o modelo para a região de estudo (Fernandes *et al*, 2001; 2002; 2004; 2005; Schiller *et al*, 2003; Monteiro, 2007; Gonçalves, 2007). Esses parâmetros são apresentados na Tabela 4.

A tensão crítica de deposição τ_{cd} foi estabelecida segundo Pearson (2006), que utilizou o módulo SUBIEF do Modelo TELEMAC para simular o transporte de sedimento em suspensão na região estuarina da Lagoa dos Patos.

Tabela 4: Principais parâmetros utilizados no TELEMAC2D

Passo de tempo	30 s
Parâmetro de Coriolis	$7,7.10^{-5}.rad.s^{-1}$
Modelo de turbulência	Modelo Smagorinski
Velocidade de deposição do silte	$0,000057 m.s^{-1}$ (Lei de Stokes)
Tensão crítica para deposição (τ_{cd})	$0,03 N.m^{-2}$

4.9 – VALIDAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO

O modelo hidrodinâmico foi validado a partir de dados de elevação do nível mar coletados na Estação dos Práticos da Barra de Rio Grande entre o período de 01/05/2002 a 28/05/2002, período em que há dados contínuos disponíveis para a validação.

Primeiramente, nos dados brutos (Figura 22) foi feita a separação de oscilações de alta frequência (maré) (figura 23) e baixa frequência (vento) (figura 24) através do filtro cossenoidal com janelas de Lanczos, com ponto de corte em 30 horas. Resultados do modelo para o mesmo local e período passaram pelo mesmo processamento. A qualidade das simulações foi verificada pelo método de Walstra *et al* (2001) que calcula o erro médio quadrático absoluto (RMAE) entre os dados medidos e simulados. Dentro do intervalo proposto pela tabela 5, a simulação apresentou boa reprodução dos resultados de elevação do nível do mar, com o índice de 0,3.

Tabela 5: Índice da qualidade da simulação (Walstra, 2001)

Excelente	< 0.2
Boa	0.2 - 0.4
Razoável	0.4 - 0.7
Pobre	0.7 - 1.0
Ruim	> 1

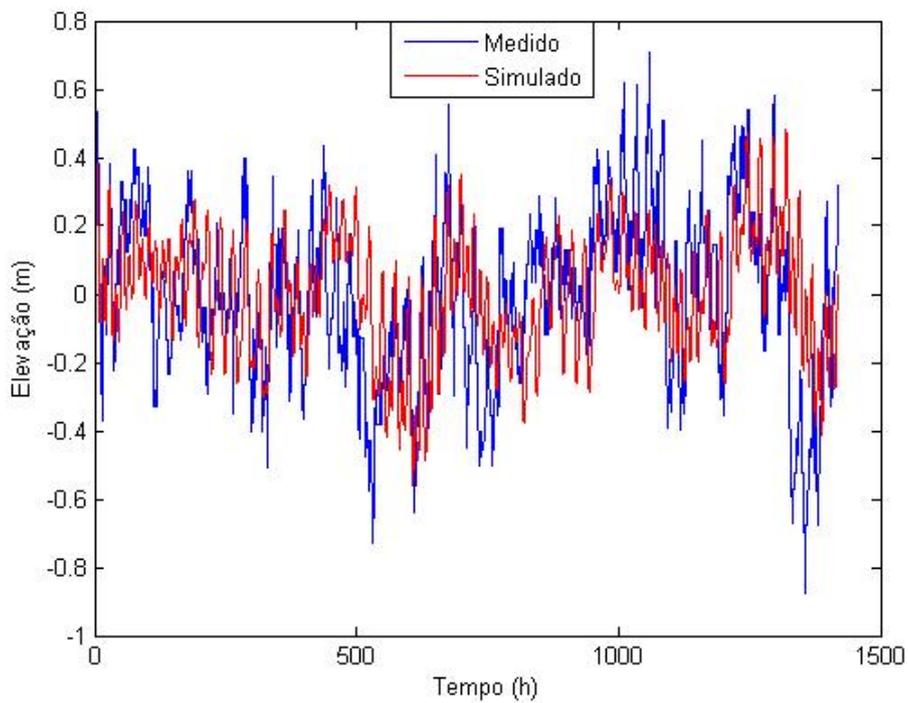


Figura 22: Comparação dos dados brutos medidos na Estação da Praticagem (azul) e do modelo (vermelho).

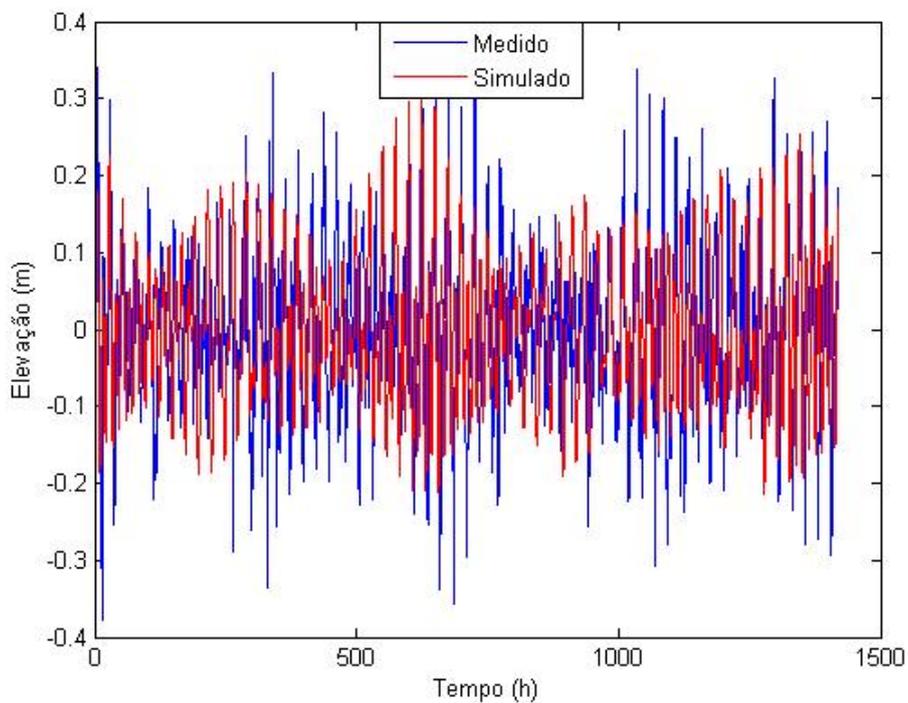


Figura 23: Comparação das oscilações de alta frequência medidas e calculadas na Estação da Praticagem (azul) e do modelo (vermelho).

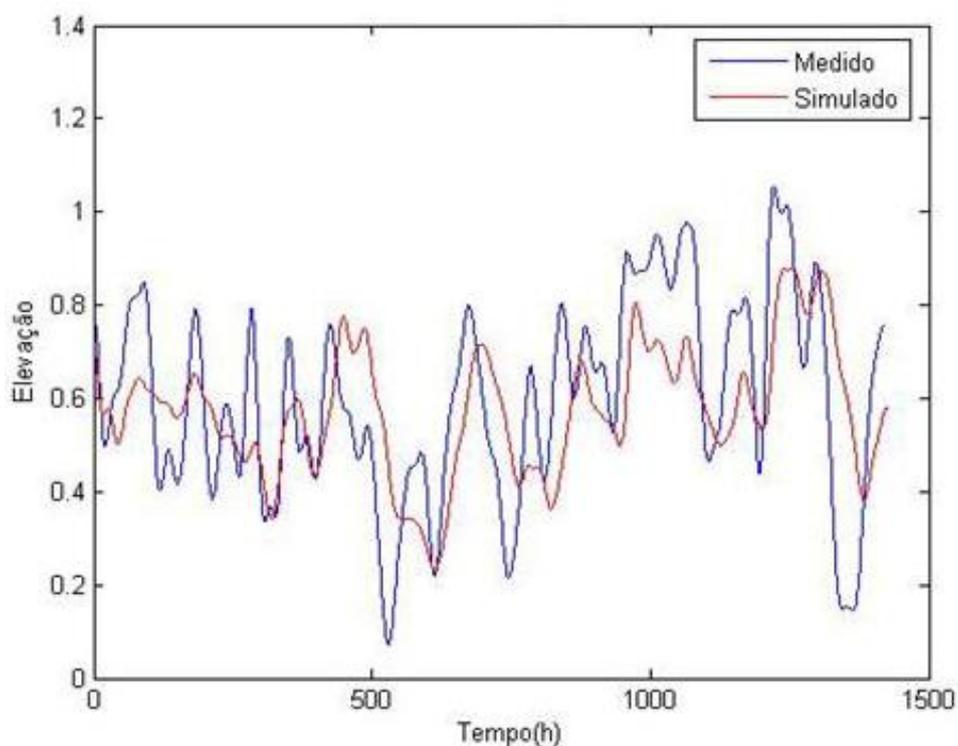


Figura 24: Comparação das oscilações de baixa frequência medidas e calculadas na Estação da Praticagem (azul) e do modelo (vermelho).

4.10 – TESTES DE SENSITIVIDADE DO SEDIMORPH AO COEFICIENTE DE EROÇÃO.

O modelo SediMorph ainda não havia sido aplicado para a região de estudo até Gonçalves (2007), que configurou os principais parâmetros utilizados nas simulações da seguinte forma:

Tabela 6: Principais parâmetros utilizados no SediMorph.

Tensão crítica para erosão (τ_{ce})	0,154 N.m ⁻²
Coeficiente de erosão (M_{ero})	10.exp ⁻⁵ kg.m ⁻² .s ⁻¹
Diâmetro / Modo de transporte do silte	0,008 mm / suspensão
Diâmetro / Modo de transporte da areia fina	0,25 mm / carga de fundo
Diâmetro / Modo de transporte da areia grossa	2 mm / Carga de fundo

A tensão crítica de erosão foi calculada através do cisalhamento crítico de Shields para o início do movimento do sedimento (Equação 18).

O SediMorph apresenta a formulação proposta por Schweim (2002) para calcular o coeficiente de erosão M_{ero} de acordo com a porosidade dos depósitos de sedimento,

$$M_{ero} = 6,23 \cdot 10^{-7} \cdot (1 - \text{Porosidade}) * \rho_s \quad (24)$$

Valores típicos de M_{ero} variam entre 10^{-3} e 10^{-5} (Malcherek *et al.* 2005). Gonçalves (2007) realizou 3 simulações preliminares para testar a sensibilidade do modelo a este parâmetro (Tabela 7).

Segundo Gonçalves (2007), as simulações foram forçadas com vento de NE (5 m.s^{-1}) e descarga fluvial no delta do rio Jacuí, ao norte do Guaíba, e no rio Camaquã (2500 e $500 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, respectivamente). A granulometria do sedimento no fundo foi iniciada com 50% de areia fina e 50 % de silte na Lagoa dos Patos, não sendo prescrito material em suspensão nas descargas fluviais.

Tabela 7: Testes de sensibilidade para M_{ero} .

Simulação	M_{ero}
A	Variável de acordo com a porosidade
B	$10 \cdot e^{-4} \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$
C	$10 \cdot e^{-5} \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$

De acordo com os testes, a simulação A apresentou valores maiores do que os já registrados na literatura para a região (Hartmann & Calliari 1995; Hartmann 1996; Niencheski *et al.* 1999; Toldo Jr. 1994). O valor de $10 \cdot e^{-5} \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ foi o que melhor representou os valores para o coeficiente de erosão pois esse era o que mais se aproximava dos valores das concentrações de silte em suspensão (Hartmann & Calliari

1995; Hartmann 1996; Niencheski *et al.*1999; Toldo Jr. 1994). Maiores detalhes sobre os testes de sensibilidade do modelo SediMorph são apresentados em Gonçalves (2007).

4.11 – CENÁRIOS SIMULADOS

Primeiramente, foi executada uma simulação com duração de 360 dias para todo o domínio, usando as distribuições sedimentológicas das condições iniciais do modelo SediMorph apresentadas no item 5.8. Para essa simulação, as forçantes hidrodinâmicas envolvidas foram: maré, vento, descarga fluvial (rios Taquari, Jacuí e Camaquã, canal do São Gonçalo). A presença de todos os rios é explicada pelo fato desses serem os responsáveis pela entrada de sedimento na lagoa dos Patos. Essa simulação apresenta as tendências deposicionais da lagoa por inteiro, no entanto, a área do Porto Novo é analisada mais detalhadamente para identificar as tendências deposicionais de silte.

Com base nestas configurações, foram testadas estruturas de deflexão de correntes com o intuito de corrigir a hidrodinâmica do local, responsável pelo assoreamento do canal. Estas estruturas de ajuste da corrente no canal do Porto foram testadas levando em consideração o seu tamanho e inclinação, evitando que sua presença influencie a navegação nesta região.

A intenção da estrutura é avaliar uma possível modificação na hidrodinâmica, fator responsável pela sedimentação. Assim, foram executados 6 testes, porém com apenas 4 (Figura 25A, 25B, 25C, 25D) com resultados satisfatórios, ou seja, que apresentaram alguma melhora no padrão de deposição de sedimentos finos na região (Figura 25). O local escolhido tem como objetivo corrigir a configuração do canal do Porto Novo de Rio Grande, aumentando assim a sua velocidade e diminuindo as condições favoráveis a deposição de sedimentos finos.

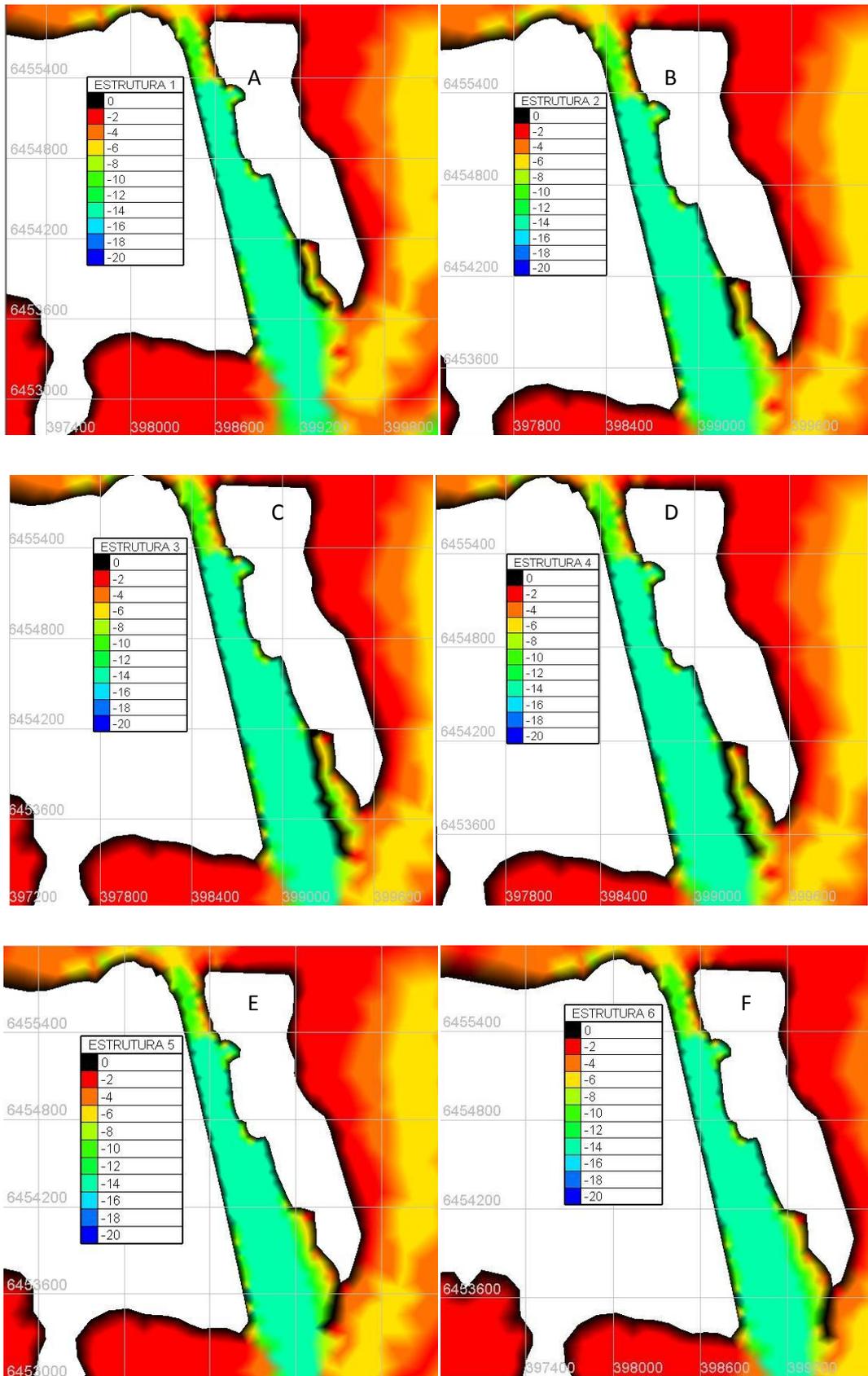


Figura 25: Simulações testes das estruturas de correção da corrente no canal do Porto Novo.

4.12 – ANÁLISE DA CIRCULAÇÃO DA REGIÃO DO PORTO NOVO

A apresentação dos resultados hidrodinâmicos consiste na análise do comportamento campo de velocidade no canal do Porto Novo em três pontos (Figura 26) e padrão de circulação nas transições do vento NE e SO, utilizando os vetores da velocidade de corrente para a região do canal. Derivadores e linhas de corrente correspondentes a essa região foram utilizados para identificação de possíveis zonas de recirculação na região. Logo após, o campo residual foi calculado no intuito de mostrar a corrente predominante. Essas informações foram retiradas da simulação com dados referentes ao ano de 2002, com duração de 365 dias.

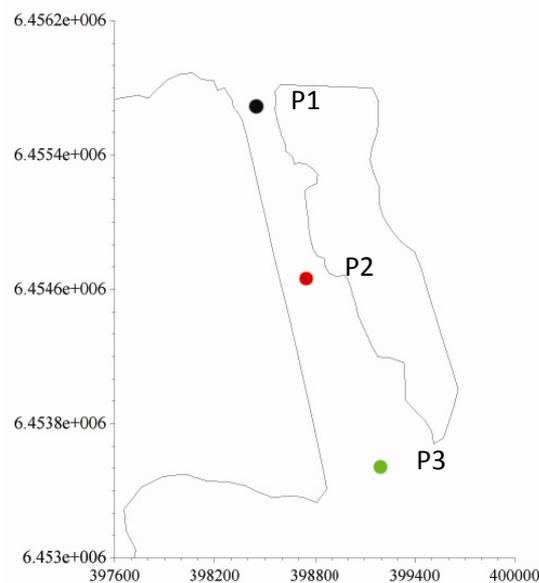


Figura 26: Pontos da análise da velocidade no canal do Porto.

4.13 – ANÁLISE DOS PROCESSOS REFERENTES À DEPOSIÇÃO DA FRAÇÃO DE SILTE NA REGIÃO DO CANAL DO PORTO NOVO

Para os processos deposicionais na região foram analisados os dados da deposição de silte na região. Essas análises consistem na porcentagem de silte que sofre

ressuspensão e deposição. Desse modo, foi analisada a variação entre a quantidade final e a inicial da simulação, incluindo séries temporais de dados pontuais desse parâmetro em regiões de maior relevância no canal (Figura 27). Os pontos apresentam a seguinte profundidade:

Tabela 8: Profundidade dos pontos.

PONTO	PROFUNDIDADE (m)
S1	2.98
S2	9.86
S3	14
S4	14
S5	10.94

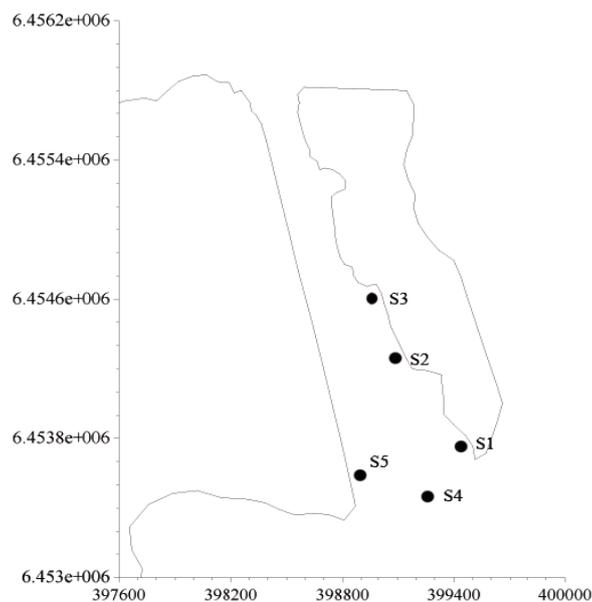


Figura 27: Pontos de coletas das séries temporais dos dados morfodinâmicos.

A influência da velocidade da corrente na deposição foi calculada através da análise do stress de deposição e do fluxo de deposição a partir das fórmulas (14) e (21) respectivamente. Essas grandezas indicam qual a situação mais propícia para a sedimentação no local.

Análises estatísticas de espectro de potência cruzada no domínio da frequência, análise de coerência, atraso de fase do fluxo de deposição e da componente mais importante da velocidade (componente Longitudinal) para a região e a análise da EOF da deposição do silte (Emery & Thomson, 1998) foram feitas para determinar qual o modo de variabilidade mais significativo na deposição de silte na região do Porto Novo e também relacionar esse resultado com as principais forçantes do ambiente e com os resultados dos fluxos de deposição.

Concomitantemente com a análise da fração de silte, é apresentada a série temporal de variação da evolução do fundo nestes pontos no período simulado. Assim, com o intuito de avaliar as diferentes situações e indicar qual estrutura de ajuste de corrente diminuiu a sedimentação no local, os resultados da simulação sem a estrutura serão comparados com os resultados das simulações com as diferentes estruturas de ajuste.

5 – RESULTADOS

5.1 – HIDRODINÂMICA DO ESTUÁRIO DA LAGOA DOS PATOS

Neste item são apresentados resultados do modelo para o período simulado, que descrevem o comportamento hidrodinâmico da Lagoa dos Patos durante períodos de ventos predominantes (NE, SO) e descargas características (alta e baixa) para o ano de 2002, o qual sofreu o efeito do El NIÑO-ENSO. Esse efeito é refletido nos altos valores da descarga fluvial para os meses de inverno na região, segundo os dados de descarga referentes a esse ano (ver figura 15).

A figura 28 indica a ação dos ventos de NE após 10 dias de simulação, correspondente ao mês de janeiro de 2002, que é caracterizado por descargas baixas (aproximadamente de $800 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Neste instante, a velocidade do vento no baixo estuário da Lagoa dos Patos é relativamente baixa, de aproximadamente $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

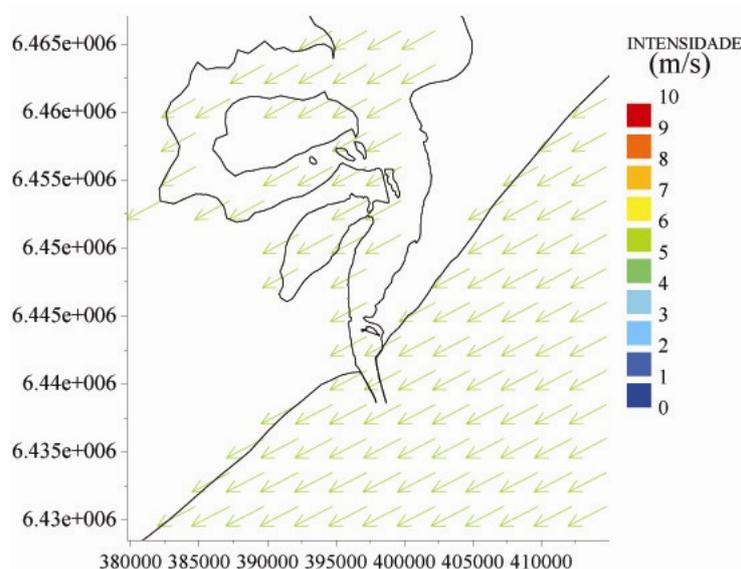


Figura 28: Vento de nordeste após 10 dias de simulação, em período de baixa descarga

A combinação da baixa descarga com o efeito local do vento de NE induz a um regime de vazante em direção à costa (Figura 29), enquanto que o efeito remoto do

vento promove o rebaixamento do nível do mar na costa, com gradiente de elevação pouco acentuado.

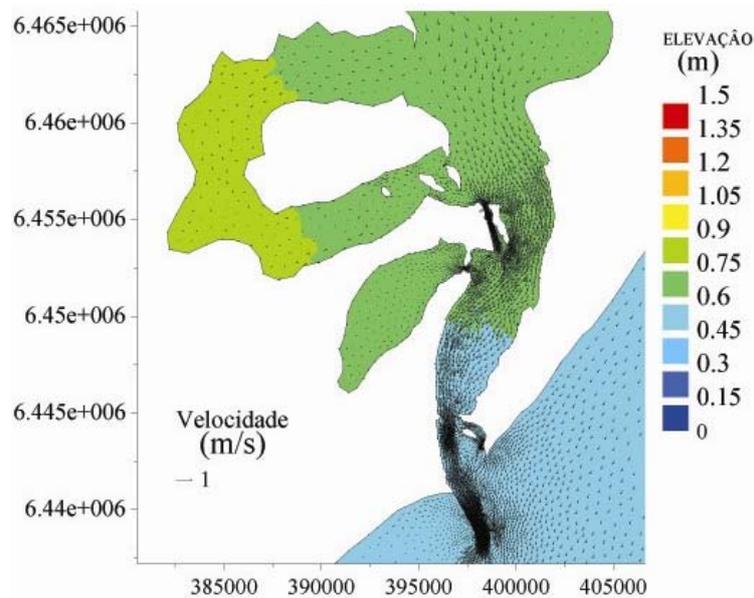


Figura 29: Elevação do nível do mar e vetores velocidade de corrente com a ação do vento de NE (6 m.s^{-1}) e baixa descarga fluvial após 10 dias de simulação.

Após 31 dias de simulação, a descarga continental permanece baixa, mas o vento passa a ser de sudoeste, com velocidade de 9 m.s^{-1} (Figura 30). O efeito remoto do vento de quadrante sul é empilhar água na costa, gerando fluxos de enchente (Figura 31). Nessa situação, a alta intensidade do vento impede que a Lagoa transporte sedimento para a zona costeira. Portanto, a circulação em condições de descarga baixa é dependente da intensidade do vento, pois é essa forçante é quem vai determinar o sentido e a intensidade da corrente, conseqüentemente, vai determinar se haverá deposição dos sedimentos em suspensão ou ressuspensão dos sedimentos do fundo.

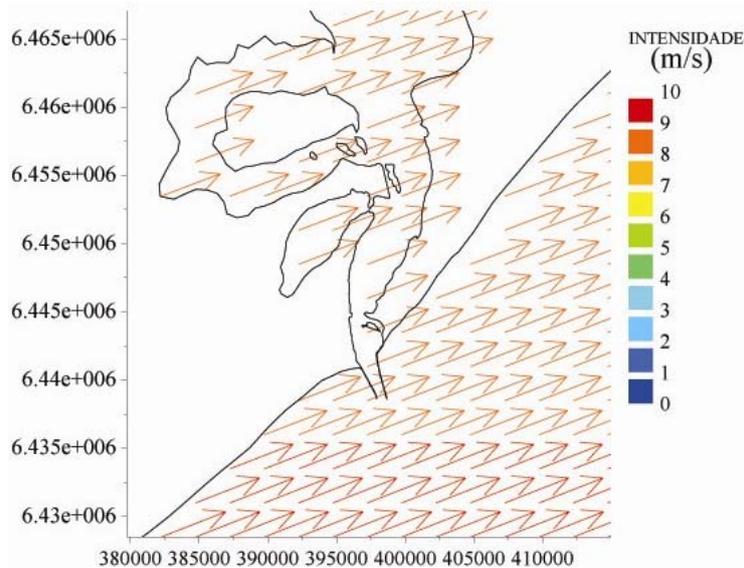


Figura 30: Ventos do quadrante sul após 31 dias de simulação, em período de baixa descarga.

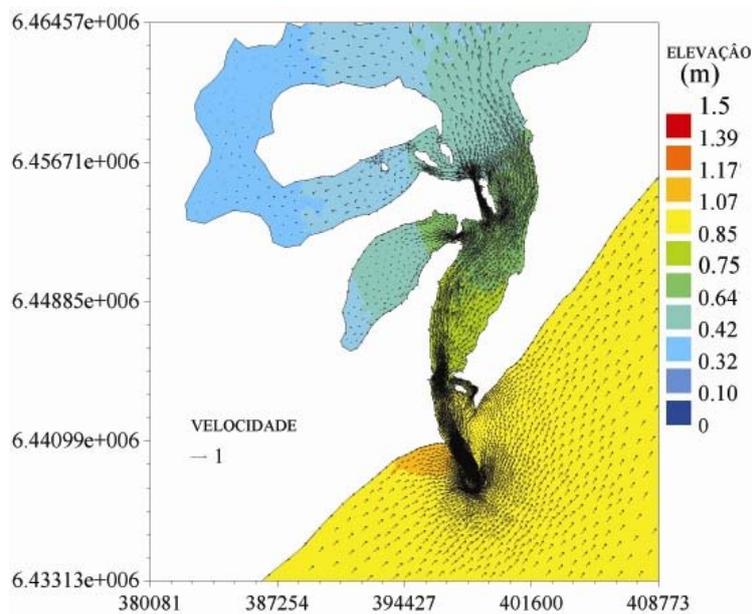


Figura 31: Elevação do nível do mar e vetores velocidade de corrente com a ação do vento de SO ($9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), após 31 dias de simulação.

Entretanto, descargas altas ($8.000 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) são características do inverno na região e em períodos de El Niño. Nestas condições, a hidrodinâmica da Lagoa dos Patos responde de forma diferente a influência dos ventos, pois nesse período aumenta a

freqüência de passagens de frentes frias pela região. A intensidade do vento vai determinar se a corrente será invertida ou apenas enfraquecida nos canais.

Após 171 dias de simulação, a maior intensidade de uma situação de vento de quadrante sul, ($7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, Figura 32), e a alta descarga dos rios promovem o empilhamento de água na região do baixo estuário, e geram fluxo de enchente (Figura 33).

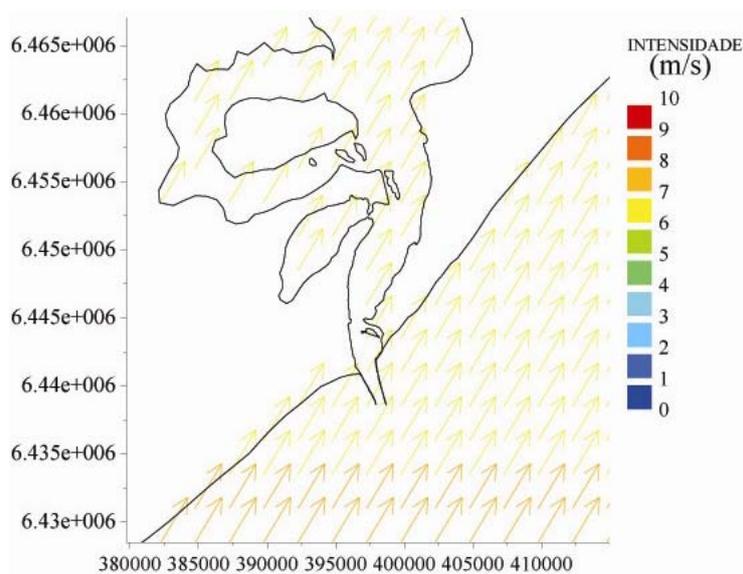


Figura 32: Ventos do quadrante sul após 171 dias de simulação, em período de alta descarga.

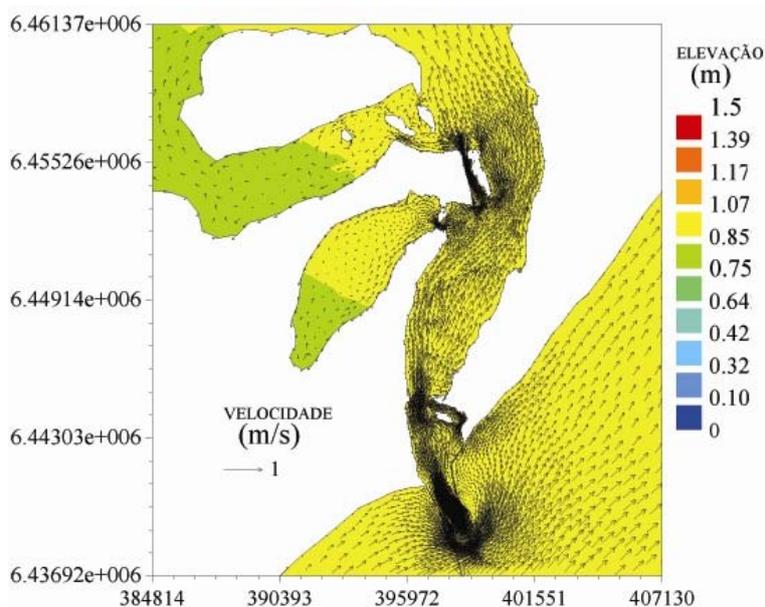


Figura 33: Elevação do nível do mar e vetores velocidade de corrente com a ação do vento de SO ($7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), após 171 dias de simulação.

Com o enfraquecimento da intensidade do vento de quadrante sul para 2 m.s^{-1} (Figura 34) após 175 dias de simulação, a descarga fluvial predomina e controla a força do gradiente de pressão direcionada para o mar, assim, que permite a ocorrência de fluxos de vazante nos canais do baixo estuário da Lagoa dos Patos, mas nas regiões menos profundas o efeito local do vento direciona o fluxo no sentido contrário (Figura 35).

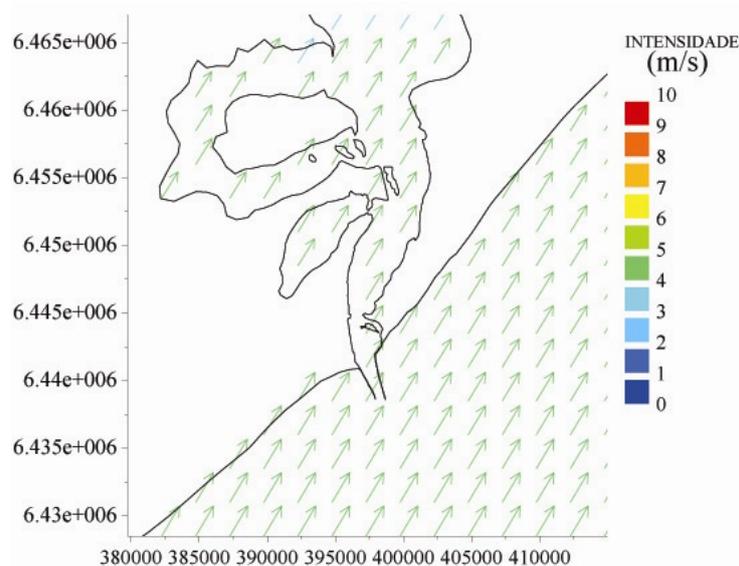


Figura 34: Ventos do quadrante sul após 175 dias de simulação, em período de alta descarga.

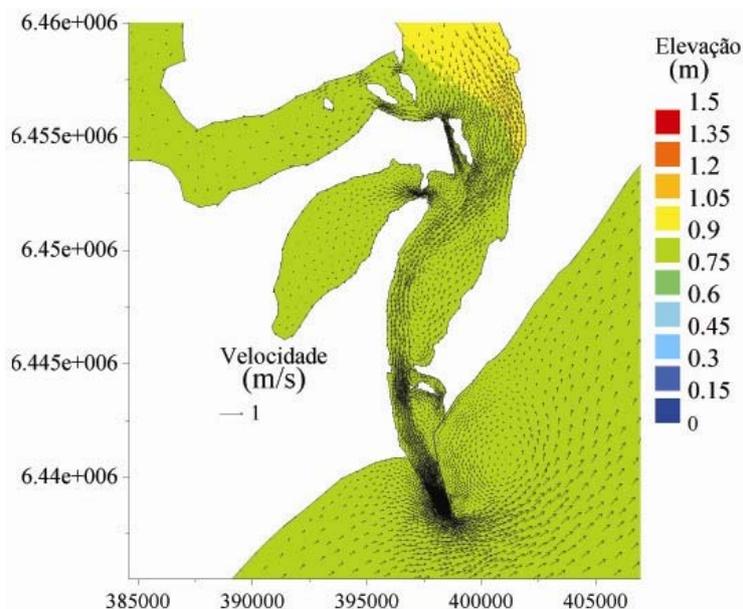


Figura 35: Elevação do nível do mar e os vetores velocidade de corrente com a ação do vento de SO (3 m.s^{-1}), após 175 dias de simulação.

A corrente de vazante é intensificada sob influência dos ventos de NE (7 m.s^{-1}) (Figura 36), embora esses ventos não sejam frequentes no período de inverno. A ação conjunta da descarga e do vento de quadrante norte geram maiores desníveis entre a Lagoa e o baixo estuário, contribuindo para o transporte de sedimentos em direção a zona costeira adjacente (Figura 37).

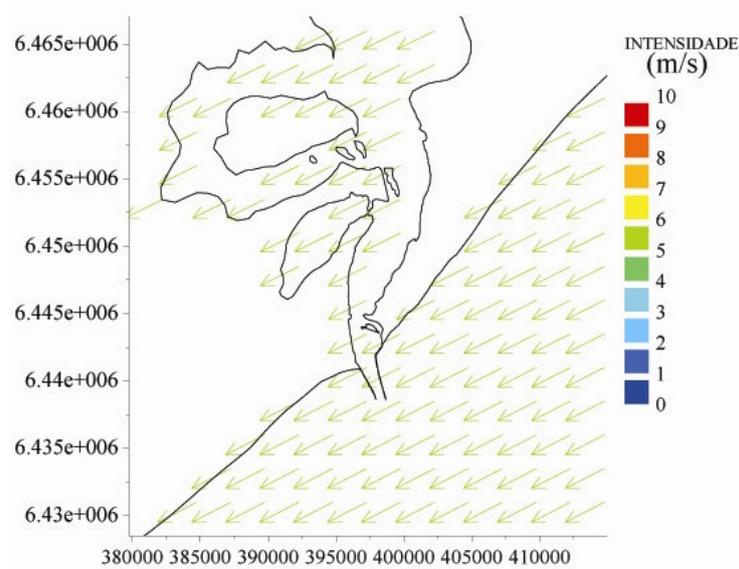


Figura 36: Ventos do quadrante norte após 182 dias de simulação, em período de alta descarga.

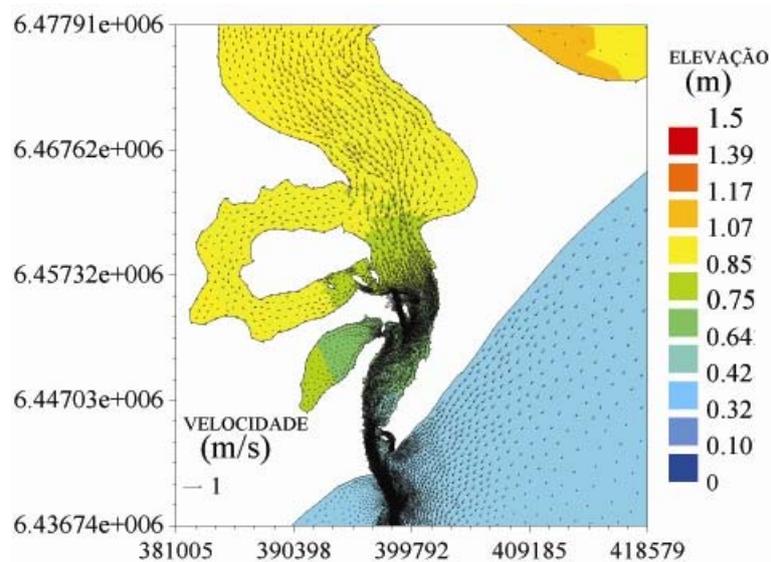


Figura 37: Elevação do nível do mar e os vetores velocidade de corrente com a ação do vento de NE (3 m.s^{-1}), após 182 dias de simulação.

Apesar das limitações associadas aos modelos bi-dimensionais, o modelo conseguiu representar a hidrodinâmica na Lagoa dos Patos no que diz respeito à resposta das forçantes predominantes (efeitos do vento local, remoto e descarga). Essa representação é essencial para que as condições hidrodinâmicas da área do Porto Novo sejam estudadas, e, portanto, como essa hidrodinâmica influencia no fluxo de deposição de sedimentos finos na região do Porto Novo.

5.2 - CONDIÇÕES HIDRODINÂMICAS DA REGIÃO DO PORTO NOVO.

Os resultados do modelo hidrodinâmico para a região do canal do Porto Novo estão de acordo com o comportamento do estuário principal, conforme descrito no item anterior. Durante períodos de baixa descarga, os ventos de NE controlam a intensidade do fluxo no sentido da vazante no canal do Porto Novo (Figura 38A). A corrente é intensificada na porção superior (até $0,5 \text{ m.s}^{-1}$) e diminui sua intensidade em direção aos Molhes da Barra ($0,12 \text{ m.s}^{-1}$). A diminuição da velocidade no canal cria condições favoráveis à deposição de sedimentos finos na saída do canal de acesso ao Porto Novo.

Os ventos de SO (Figura 38B) promovem fluxos de enchente nesta região, com correntes intensificadas na margem leste do Terrapleno. A fraca influência da descarga permite que o vento controle a intensidade e a direção da corrente. Nestas condições, o sedimento pode sofrer ressuspensão e voltar à coluna d'água.

Em períodos de alta descarga, a influência desta é dominante sobre o efeito do vento, promovendo fluxos de vazante nas duas direções de ventos predominantes (SO e NE) na região do Porto Novo (Figura 39A e 39B), embora as correntes apresentem maior intensidade em situações de vento NE. Com o aumento da descarga, aumenta a disponibilidade de sedimentos para a Lagoa, conseqüentemente esse sedimento é depositado nas áreas onde a hidrodinâmica é menos intensa. Apesar de estar no sentido da vazante, a corrente na Figura 37A está sob a ação de ventos de quadrante sul que,

agindo em sentido contrário ao da corrente, diminui a velocidade no canal, favorecendo a deposição na região do Porto Novo.

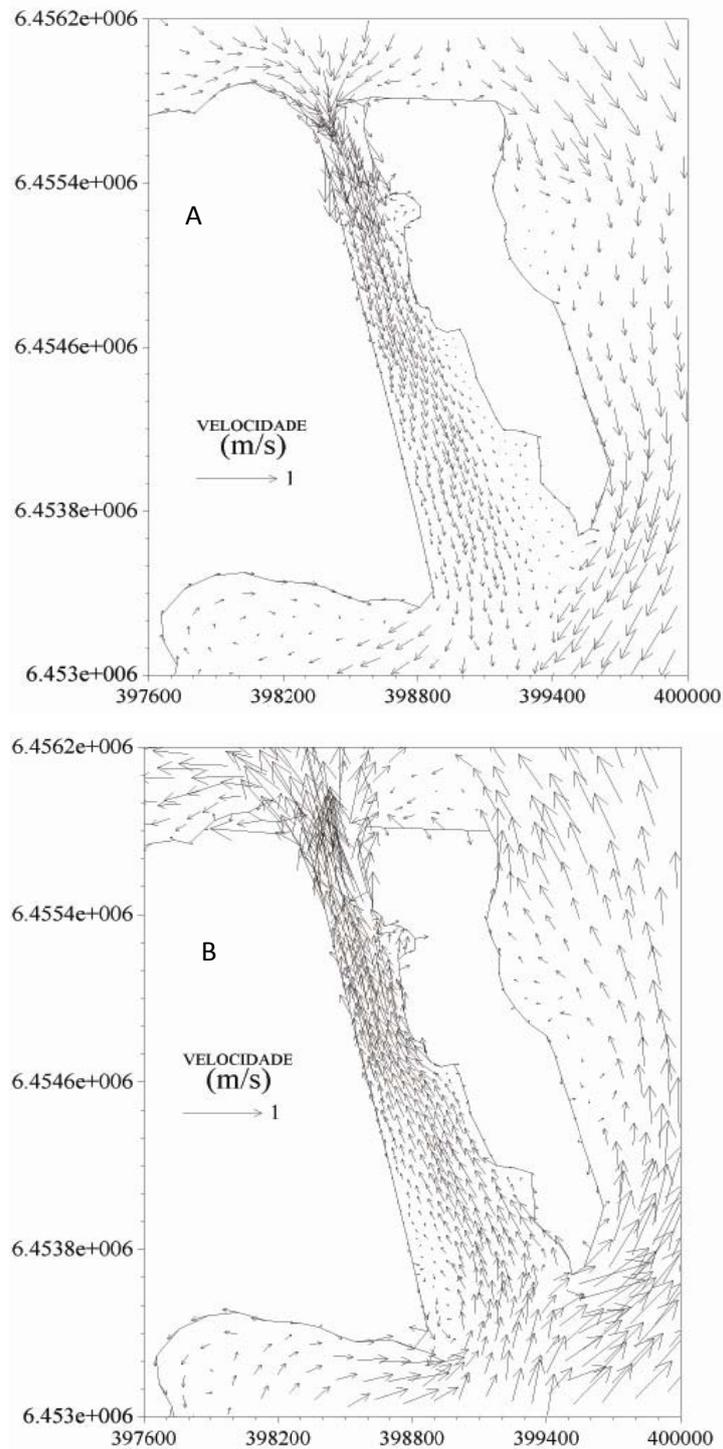


Figura 38: Vetores velocidade de corrente em regime de vento a) NE ($1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) após 10 dias de simulação e b) SO ($5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), após 31 dias de simulação na área do Porto Novo em períodos de baixa descarga ($< 800 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$).

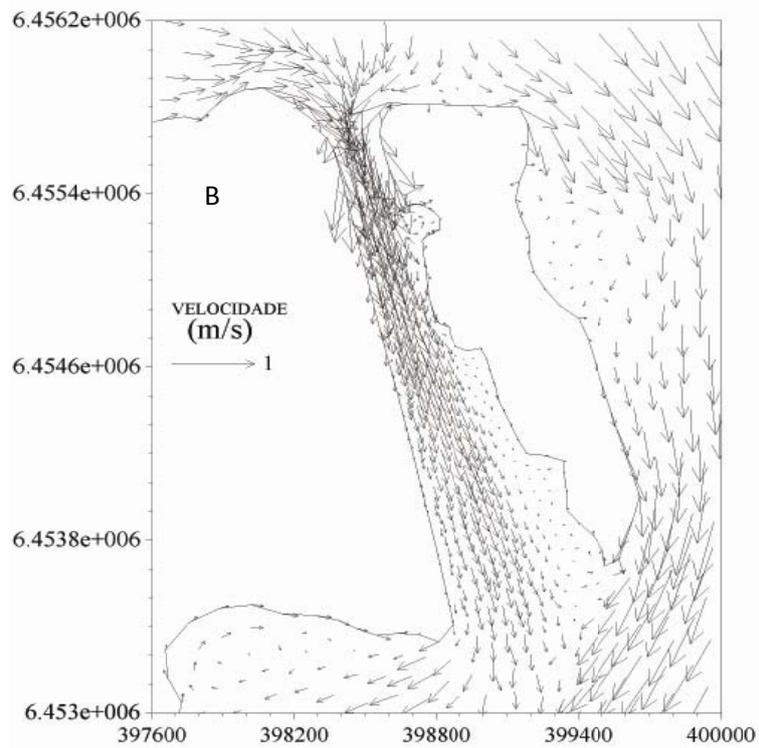
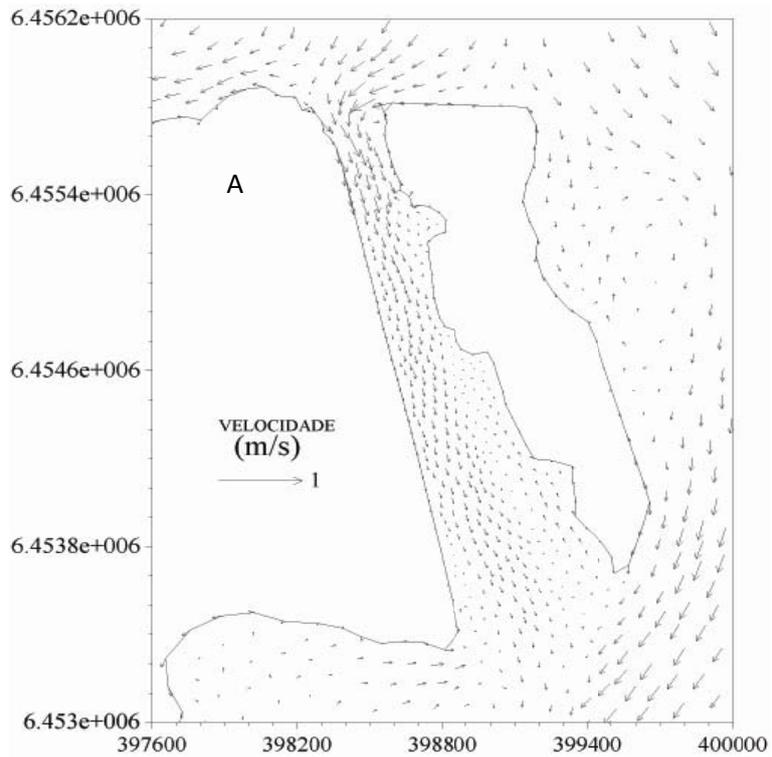


Figura 39: Vetores velocidade de corrente em regime de vento A) SO ($3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), após 175 dias de simulação, e B) NE ($7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), após 182 dias de simulação na área do Porto Novo em períodos de alta descarga (aprox. $8.000 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$).

De forma a visualizar a variabilidade da corrente ao longo do canal do Porto Novo, séries temporais de médias diárias de velocidade de corrente foram extraídas em três pontos (Figura 27). De uma forma geral, os vetores velocidade de corrente indicam maior frequência de situações de vazante do que enchente (Figura 40). Além disso, fica claro que o canal apresenta apenas um regime por vez, ou seja, não há situações de vazante e enchente ocorrendo simultaneamente. Durante períodos de vazante (vento de NE), a velocidade varia de 0,026 a 1 m.s⁻¹ na parte superior do canal (P1), de 0,002 a 0,056 m.s⁻¹ no meio (P2) e de 0,003 a 0,3 m.s⁻¹ na parte inferior do canal (P3). Durante a ação de ventos de SO, a corrente se inverte e os valores da velocidade variam de 0,15 a 0,82 m.s⁻¹ na parte superior, de 0,002 a 0,48 m.s⁻¹ no meio e de 0,005 a 0,48 m.s⁻¹ na parte inferior do canal. Desse modo, a porção inferior do canal, na região do ponto P3, exhibe condições mais favoráveis a deposição de sedimentos finos, já que o fluxo perde a competência de transportá-los para fora desta região.

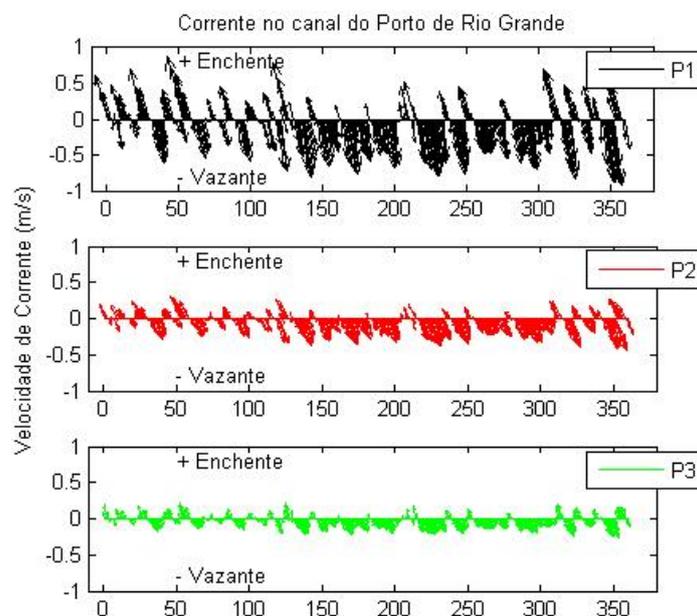


Figura 40: Intensidade e direção estimadas da velocidade de corrente ao longo do canal nos pontos P1, P2, e P3.

Os resultados do modelo também mostram que em momentos de transição de vento de SO para NE, uma zona de recirculação se forma na porção final da margem oeste da ilha (Figura 41). Esta zona de recirculação é caracterizada por velocidades baixas, fazendo desta região a de maior probabilidade de sedimentação. Possivelmente essa zona ocorre, além da atuação bidirecional do vento, por causa da variação batimétrica nessa porção do canal, em que a variação batimétrica vai de 14 m no canal até aproximadamente 2 metros na margem do Terrapleno. Assim, o fluxo é intenso no canal e na porção externa da ilha. O encontro do fluxo do canal do Porto Novo com o fluxo do canal a leste da ilha impede que as águas na porção mais rasa sejam transportadas para fora do canal.

Na situação inversa, ou seja, na transição do vento de NE para SO, ocorre a formação de células de recirculação na saída do canal (Figura 42). A corrente é intensificada na margem da ilha.

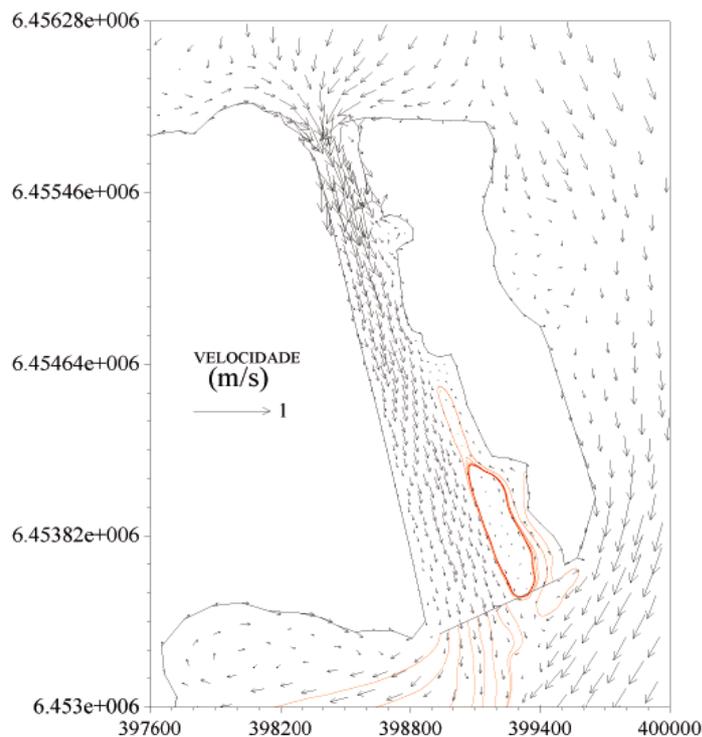


Figura 41: Linhas de corrente (em vermelho) indicando a zona de recirculação na transição de ventos NE para SO, após 48 dias de simulação.

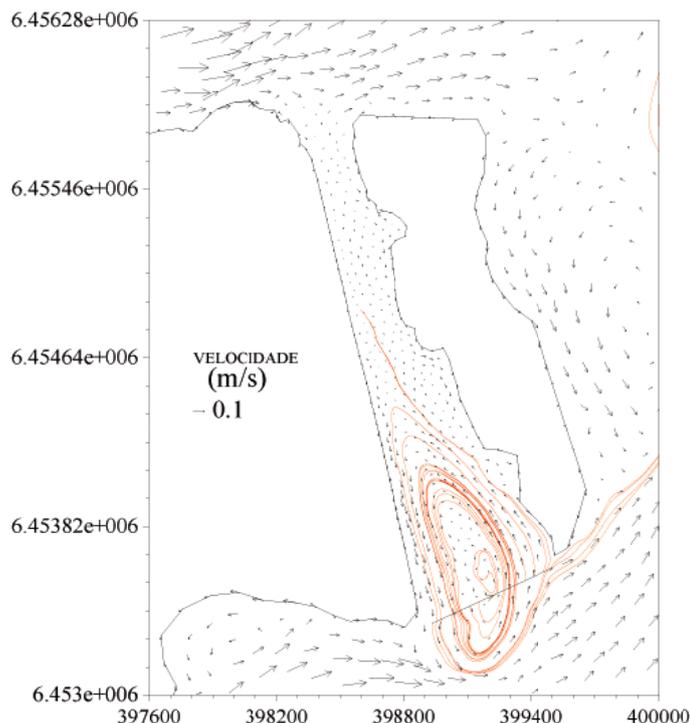


Figura 42: Linhas de corrente (em vermelho) indicando a zona de recirculação na transição de ventos de SO para NE após 52 dias de simulação.

5.3 – RESULTADOS MORFODINÂMICOS

5.3.1- FRAÇÃO DE SILTE DEPOSITADA

A análise da fração de silte depositada ao término de 1 ano de simulação é apresentada na figura 43. A maior porcentagem de silte depositado se dá nas margens onde o campo de velocidade sofre maior variação de intensidade. A região em questão é a extremidade com maior seção transversal do canal, a margem oeste da Ilha do Terraplino, aonde as concentrações de silte chegam a aproximadamente 80% do total depositado. O padrão de deposição acompanha a maior frequência da direção da velocidade, correspondente a situação de vazante.

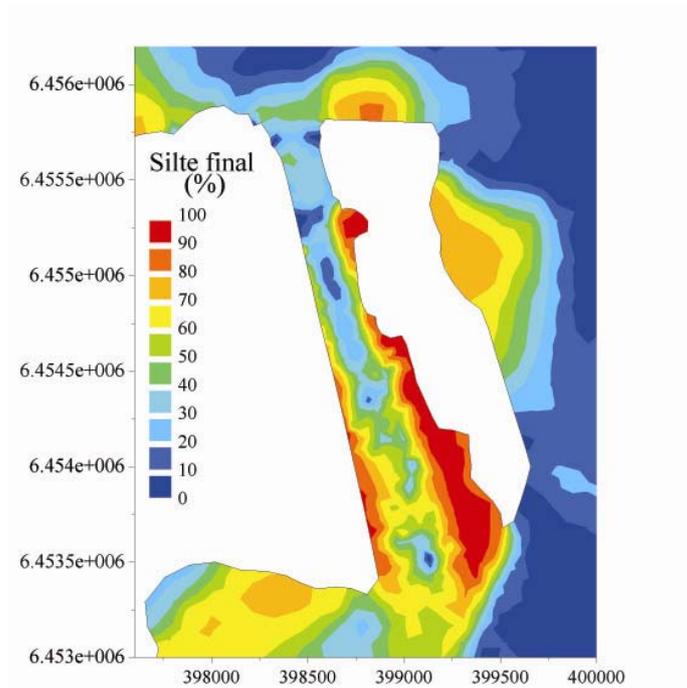


Figura 43: Fração de silte depositado na área do Porto Novo após 1 ano de simulação.

A variação da quantidade de silte depositado, ou seja, a quantidade final subtraída da quantidade inicial, é apresentada na figura 44. Na parte superior do canal do Porto Novo, não há registro de deposição de silte em função das maiores velocidades de corrente observadas nesta região. A sedimentação de silte é predominante na porção sul do canal do Porto Novo, onde são observados os menores valores de velocidades e a ocorrência das zonas de recirculação. No canal principal do Porto Novo, a deposição do silte tem início no ponto onde começa a aumentar a seção transversal do canal, sendo observado até 30% de deposição. Os resultados indicam que a deposição de silte está relacionada com a intensidade da velocidade de corrente, sendo menor nas regiões mais profundas devido às maiores velocidades, que impedem a deposição de sedimentos mais finos.

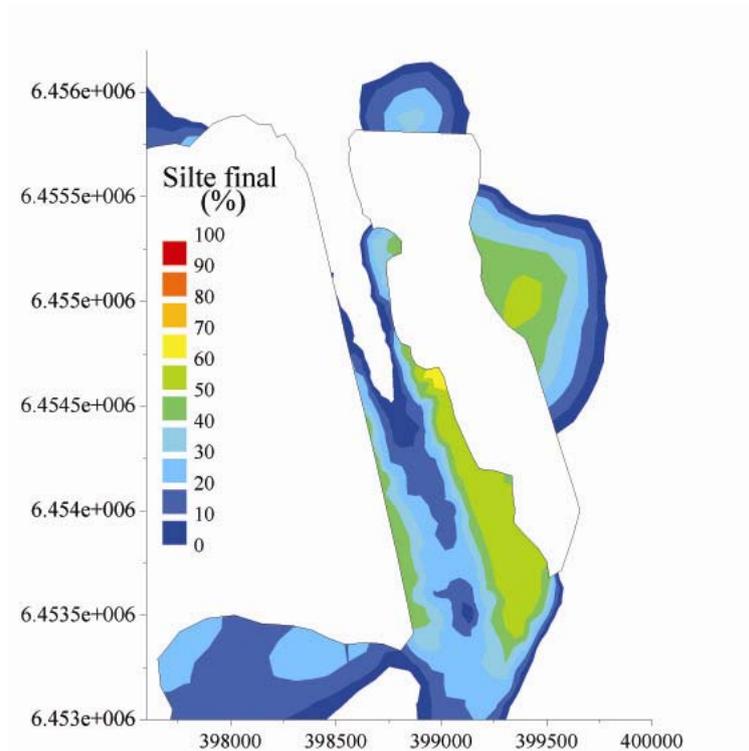


Figura 44: Variação do Silte ao fim da simulação na região do canal do Porto Novo.

A taxa de deposição após um ano de simulação foi analisada em 5 pontos da região (Figura 27). Os pontos foram escolhidos de acordo com as regiões onde há a maior possibilidade de deposição, segundo dados fornecidos pelo modelo (Figura 45).

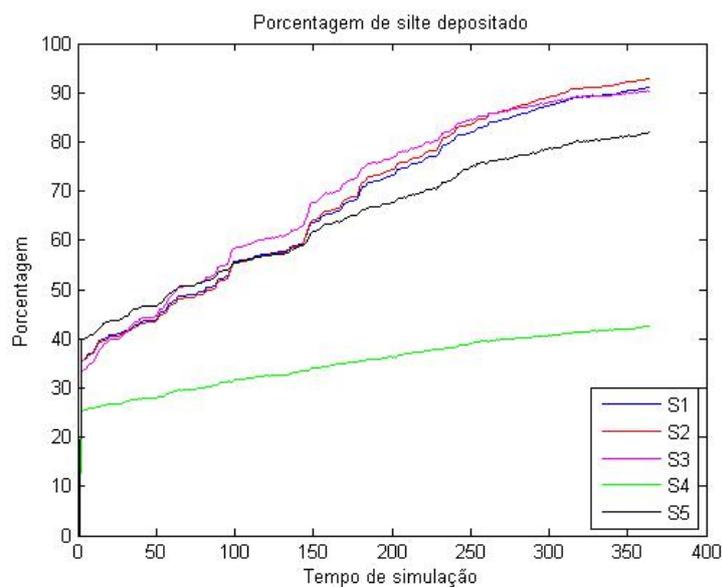


Figura 45: Variação temporal no percentual de deposição de silte nos pontos S1,S2,S3,S4,S5.

A maior variação ocorre na margem leste do canal, onde estão localizadas as áreas abrigadas (pontos S1,S2,S3) e na margem oeste do canal (S5). Essa região é caracterizada pela formação de zonas de recirculação, alternadas pelas inversões na direção da corrente. A menor variação ocorreu no ponto S4, localizado no canal de acesso do Porto Novo.

5.3.2 – FLUXOS DE DEPOSIÇÃO

O fluxo de deposição é a grandeza que indica a tendência de deposição do sedimento, e sua formulação assume que não haverá deposição quando a tensão de cisalhamento e, conseqüentemente, a turbulência na coluna d'água, for maior que a tensão de deposição. Portanto, a deposição irá ocorrer quando o módulo da velocidade for menor que a velocidade de acordo com o parâmetro de Stokes, ou ainda, quando a tensão de fundo for menor que a tensão crítica para deposição ($0,03 \text{ N/m}^2$). Desse modo, foram calculados os fluxos de deposição para os pontos S1, S4, S5 e comparados com a tensão de deposição e os vetores de velocidade, levando em consideração a sua magnitude e direção (Figuras 46, 47, 48). Os pontos S2 e S3 apresentaram padrões semelhantes ao S1, e seus resultados não serão apresentados.

No ponto S1 (Figura 46), é possível notar que os vetores de velocidade de corrente nessa região têm maior ocorrência de valores positivos (enchente) de até $0,25 \text{ m.s}^{-1}$, ainda que essa intensidade não tenha sido estimada com freqüência. Isso ocorre porque este ponto está localizado em uma região mais rasa e abrigada da Ilha do Terrapleno, onde ocorre a zona de recirculação apresentada anteriormente. Os gráficos indicam que os picos de deposição (em azul) são mais acentuados e freqüentes nos períodos de inverno, chegando a um máximo de $1,8 \times 10^{-6} \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{s}$, e coincidem com o aumento da descarga fluvial, enquanto que a tensão de fundo apresenta valores de até $0,05 \text{ N/m}^2$ no início da simulação, ou seja, no verão. Esse resultado indica que a deposição é mais

freqüente em períodos de maior descarga em decorrência do maior aporte sedimentar nesse período.

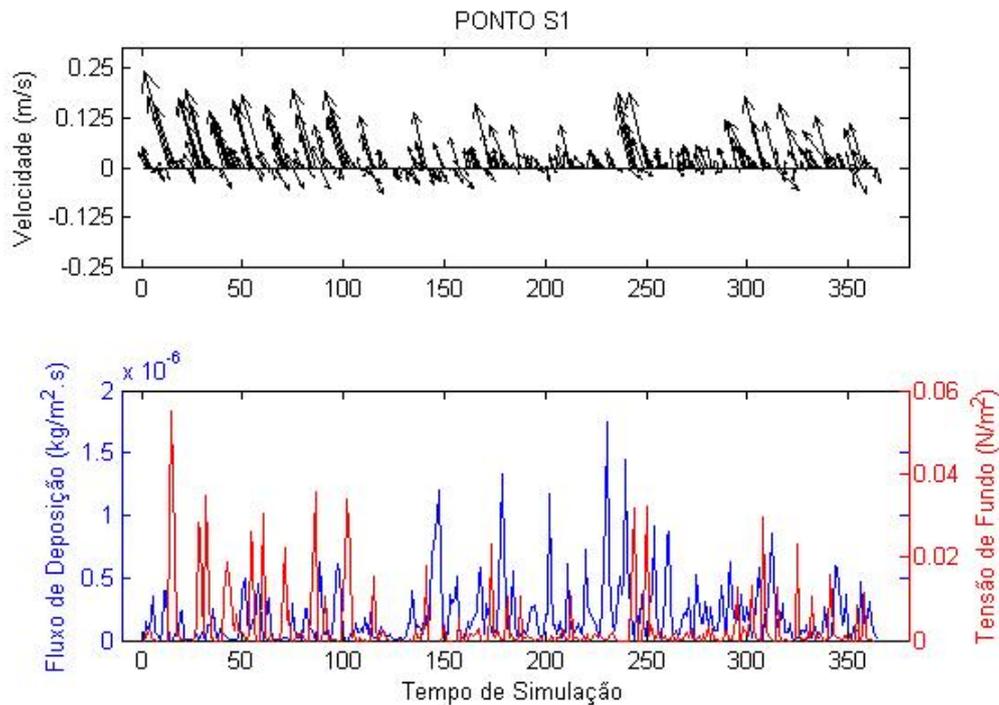


Figura 46:A) Velocidade da corrente, B) Fluxo de deposição (azul) e tensão de fundo (vermelho) no ponto S1.

O ponto S4 (Figura 47), localizado no canal, sofre maior ação da hidrodinâmica local, visto que sofre maior ação das correntes na região, principalmente no sentido da vazante, com picos de 0,25 m/s. Por isso, os valores de tensão de fundo são mais altos e freqüentes, atingindo até 0.05 N/m². Conseqüentemente, a deposição se torna mais difícil, ainda que registre um pico significativo no fluxo de deposição de 5.58x10⁻⁶ Kg/m²s. Por causa desses efeitos, essa região é menos favorável a deposição de silte.

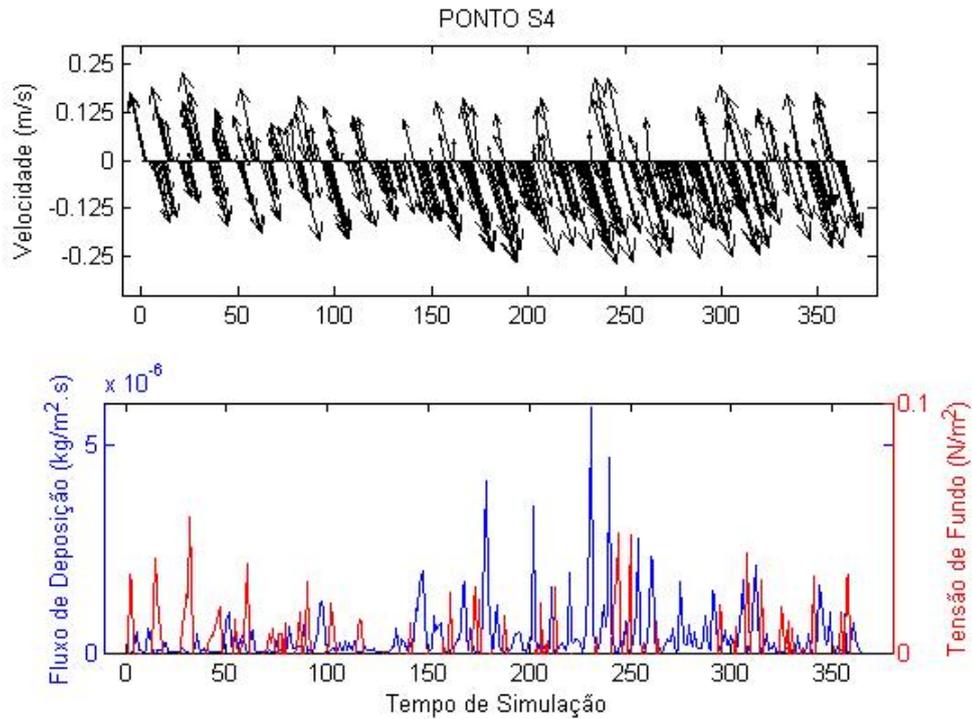


Figura 47: A) Velocidade da corrente, B) Fluxo de deposição (azul) e tensão de fundo (vermelho) no ponto S4.

O ponto S5 (Figura 48) está localizado na margem oeste do canal do Porto Novo e está sujeito a baixas intensidades de corrente, de até 0,125 m/s, predominantemente no sentido de vazante. Esse ponto apresenta uma situação intermediária entre os pontos S1 e S5. Seus valores de fluxo de deposição são baixos, atingindo até $2,25 \times 10^{-6} \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ durante o período de descarga alta. A tensão no fundo também apresenta valores baixos, de até $0,01 \text{ N/m}^2$, associados aos baixos valores de fluxo de deposição que resultam em um processo de sedimentação maior do que no canal.

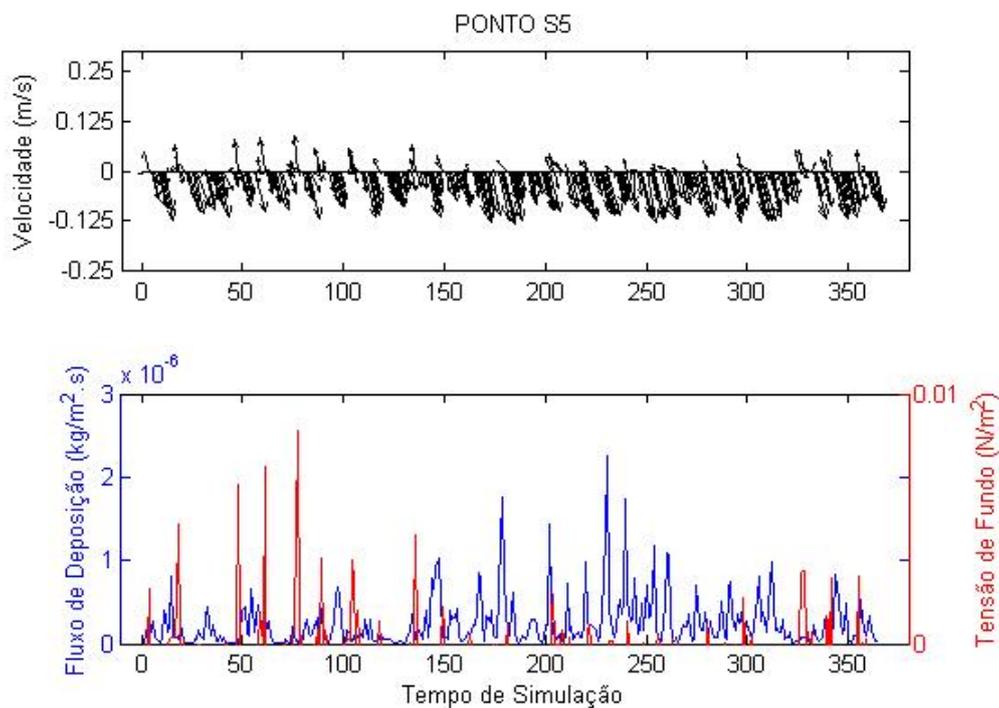


Figura 48: A) Velocidade da corrente, B) Fluxo de deposição (azul) e tensão de fundo (vermelho) no ponto S5.

5.4 – ESPECTRO CRUZADO DE POTÊNCIA, ANÁLISE DE COERÊNCIA E ATRASO DE FASE ENTRE O FLUXO DE DEPOSIÇÃO E A COMPONENTE LONGITUDINAL DA VELOCIDADE.

O espectro cruzado de potência entre o fluxo de deposição e a componente longitudinal da velocidade é apresentado para o ponto S1 (Figura 27). A componente em questão foi escolhida devido à orientação do canal, que não apresenta fluxos transversais significantes. Esse ponto é escolhido porque está situado numa área rasa dentro da região de maior probabilidade de deposição para a fração silte.

De acordo com a figura 49, o espectro cruzado entre o fluxo de deposição e a componente longitudinal da velocidade, com nível apresenta picos acima do intervalo de significância (0,77) na banda de frequência de 7, 10 e 180 dias onde as duas primeiras são referentes à atuação do vento e, a última, à descarga respectivamente.

Esses picos mostram que a maior parte da variabilidade do fluxo de deposição é controlada pela influência da componente longitudinal da velocidade. O vento está relacionado com a velocidade favorável à deposição, ou seja, os eventos de passagem de frentes frias tendem a desacelerar o ambiente até que atinjam o ponto ótimo da deposição de acordo com a velocidade de $w = 0.000057$ m/s, de acordo com a lei de Stokes para a deposição do silte. A descarga influencia a disponibilidade de sedimento no ambiente, portanto os fluxos de deposição são intensificados no período de maior volume.

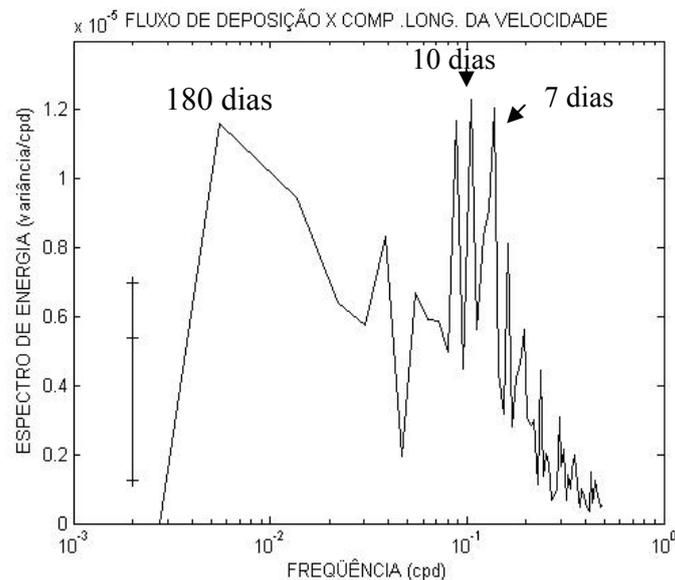


Figura 49: Análise espectral cruzada entre o fluxo de deposição e componente longitudinal da velocidade da corrente.

A análise de coerência e fase está na figura 50. A linha preta indica que acima de 0,77 existe coerência entre os dados, para um nível de confiança de 95%. Essa análise indica que para os picos significativos há uma relação linear entre o fluxo de deposição e componente longitudinal da velocidade nas bandas de frequência relativas à passagem de frentes (7 a 10 dias) e a sazonalidade da descarga fluvial (180 dias). Nos processos de baixa frequência, as variáveis estão em fase. No entanto, os processos de alta

frequência, essas variáveis estão em discordância de fase, o que pode ser entendido que elas não ocorrem simultaneamente.

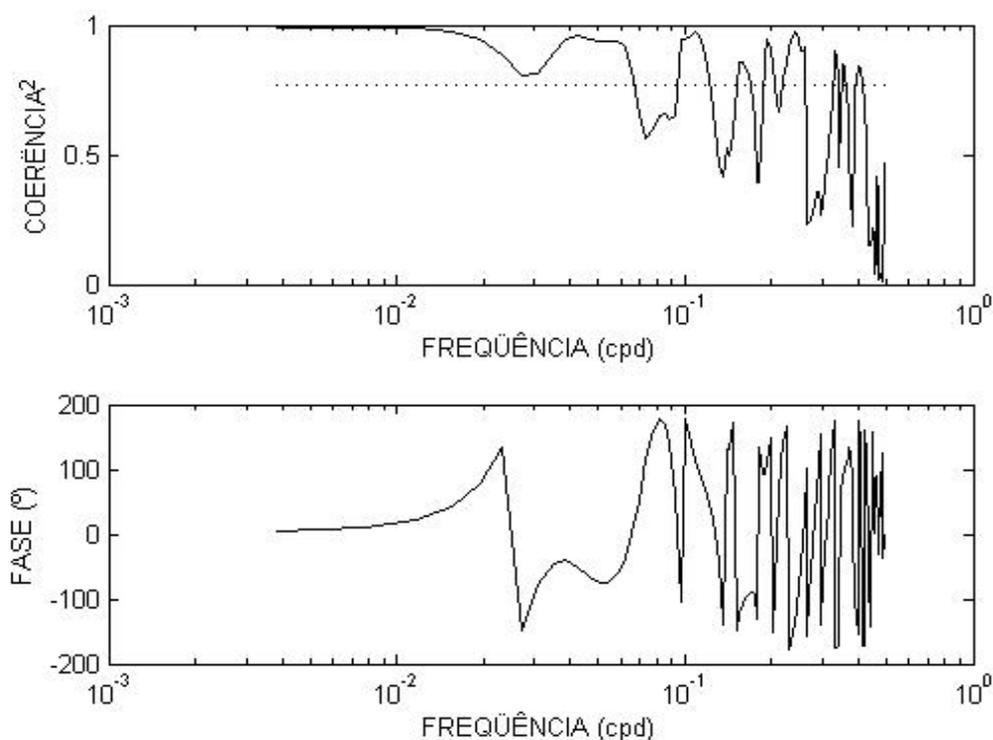


Figura 50: Espectro de coerência e fase. A linha preta indica um nível de significância de 95%.

5.5– MODOS DE VARIABILIDADE DA DEPOSIÇÃO DE SILTE

Os modos de variabilidade da deposição de silte foram calculados através de EOF's (*Empirical Orthogonal Function*). O primeiro modo de EOF significa o modo dominante de variabilidade espacial da região e corresponde a 84% da variabilidade (Figura 51). Esse modo representa um pico de 180 dias (Figura 52), e está relacionado com o ciclo sazonal da descarga dos rios (com o ciclo típico indicando alta descarga no inverno e primavera e baixa descarga no verão e outono), que são os fornecedores de sedimento para o ambiente. Considerando que os ciclos de deposição ocorrem em escalas de tempo curtas (escala de dias) associados à variabilidade da corrente pela ação

local do vento, esse efeito sofre modulação da descarga fluvial em escala de meses. Portanto, o fluxo de deposição responde às variações da descarga, aumentando seus valores no período respectivo ao aumento da mesma.

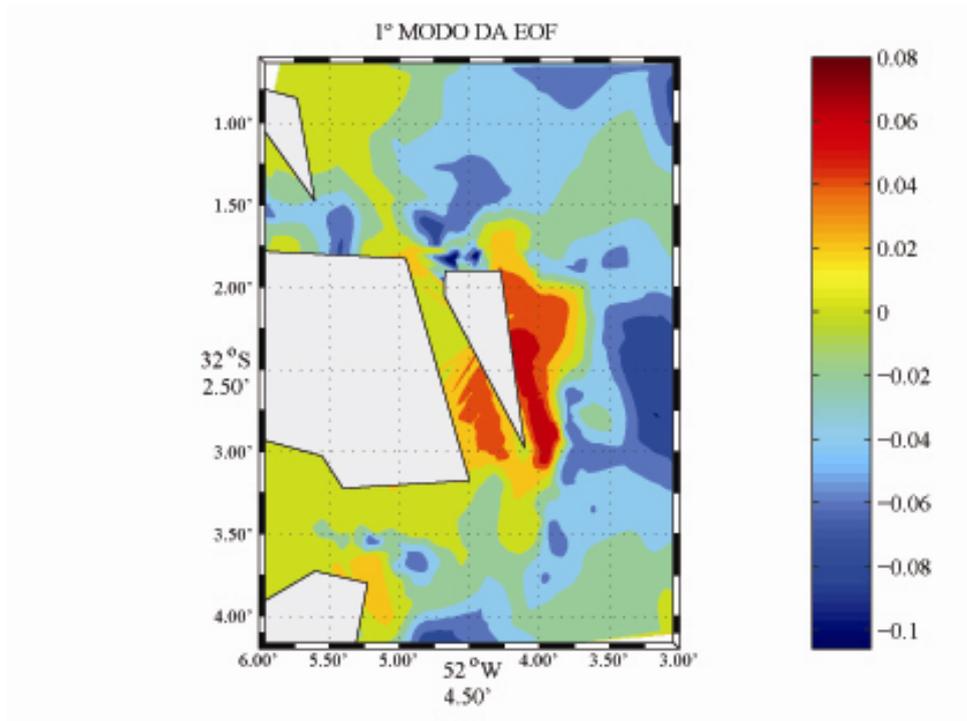


Figura 51: Modo de variabilidade mais significativo.

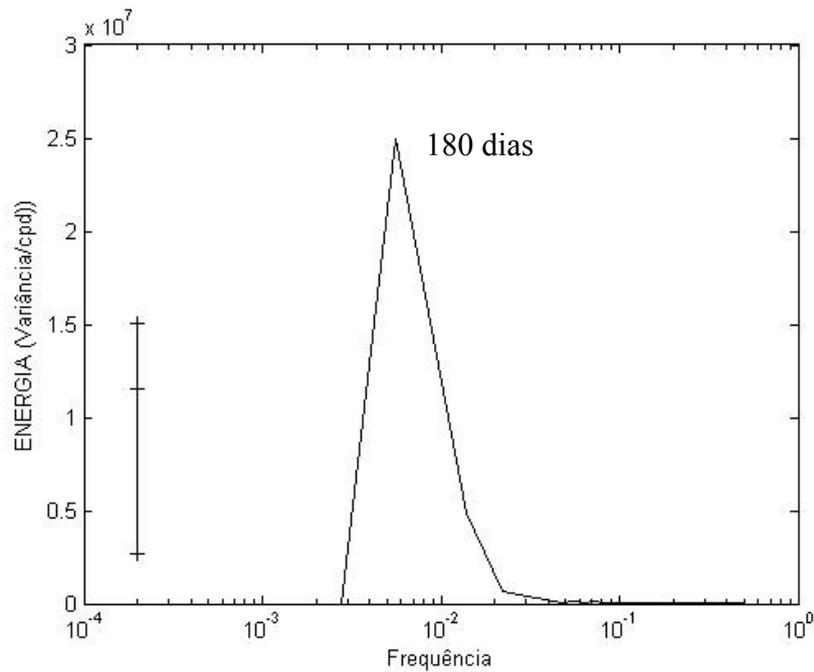


Figura 52: Espectro de potência da deposição de silte.

5.6 – EVOLUÇÃO DO FUNDO DO CANAL DO PORTO NOVO

A evolução do fundo é a resposta final entre os processos hidrodinâmicos e sedimentares e indicam se predomina a erosão ou a deposição no ambiente em questão. Assim, a variável que calcula a evolução do fundo indica se houve tendência de acúmulo ou erosão de silte ao longo do tempo simulado. Portanto, é proporcional ao fluxo de deposição, que na região do Porto Novo acontece das margens para o canal, que vai diminuindo seu calado ao longo do tempo (Figura 53), comprovando que se espera, assoreamento nessa região. A escala de evolução foi determinada com o intuito de visualizar os processos na região do Porto Novo, portanto, os espaços em branco indicam que a evolução do fundo foi maior ou menor que a escala escolhida.

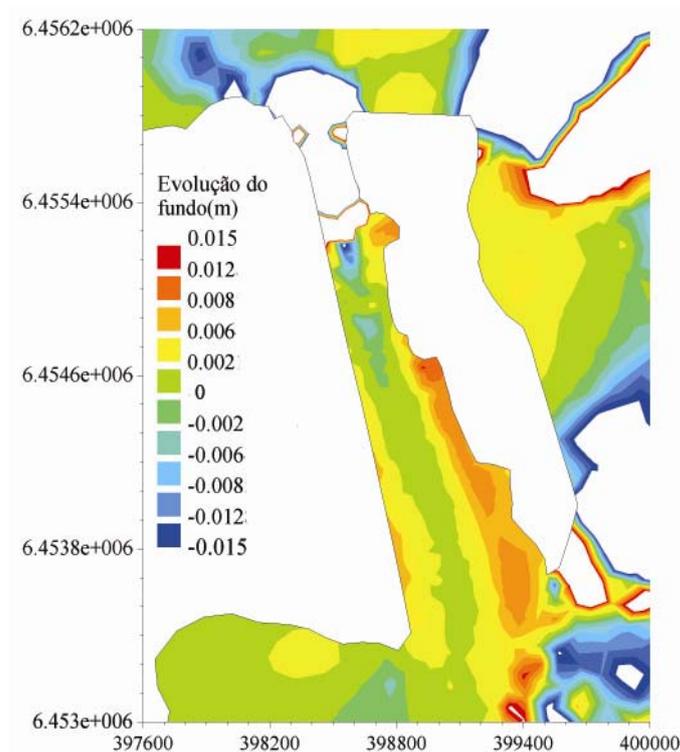


Figura 53: Evolução do fundo na área do Porto Novo. Valores positivos indicam deposição, enquanto que valores negativos indicam erosão.

Os pontos S1, S4 e S5 (Figura 27) foram escolhidos para apresentação da evolução de fundo das áreas de interesse. Os gráficos foram separados de acordo com a ordem de grandeza da evolução, em que os pontos S4 e S5 foram colocados no mesmo

gráfico. A tendência apresenta aumento a partir de 125 dias de simulação, coincidindo com o aumento na intensidade da descarga (Figura 54). Os resultados corroboram a tendência de deposição observada no ponto S1.

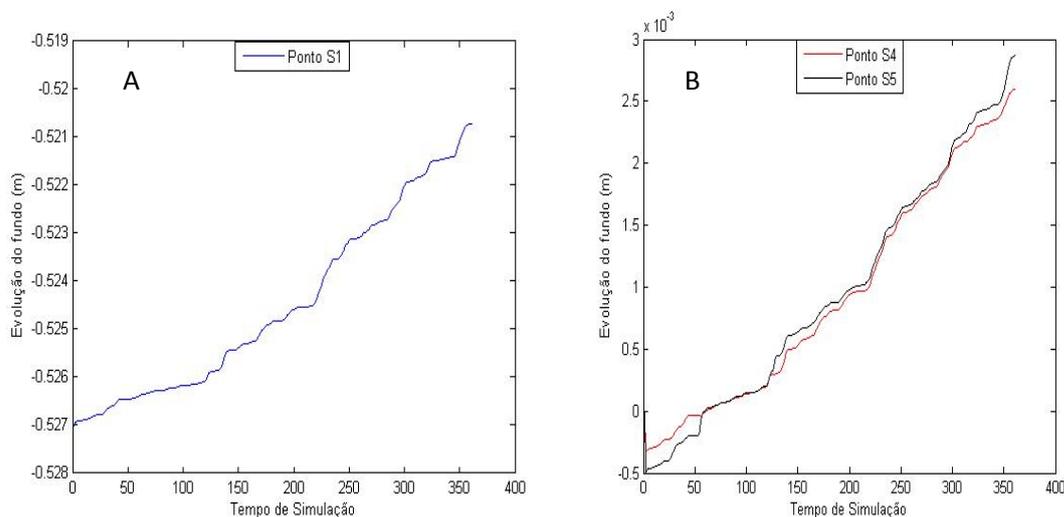


Figura 54: Série temporal de evolução do fundo nos pontos (A) S1, (B) S4,S5.

5.7 – VELOCIDADE RESIDUAL NA ÁREA DO PORTO NOVO

A velocidade residual indica a situação resultante do sistema quando removida a contribuição da maré e para o canal do Porto Novo, cuja resultante está no sentido da vazante. Esse padrão não ocorre em todo o domínio do canal. Na margem do Terrapleno, os vetores de velocidade residual indicam um aprisionamento de água nessa porção com sentido contrário a circulação, além de indicar menor intensidade. Ao comparar o campo residual da velocidade (Figura 55A) com a porcentagem de silte depositada (Figura 55B), as áreas de maior deposição estão justamente onde os vetores do residual da velocidade possuem baixa intensidade.

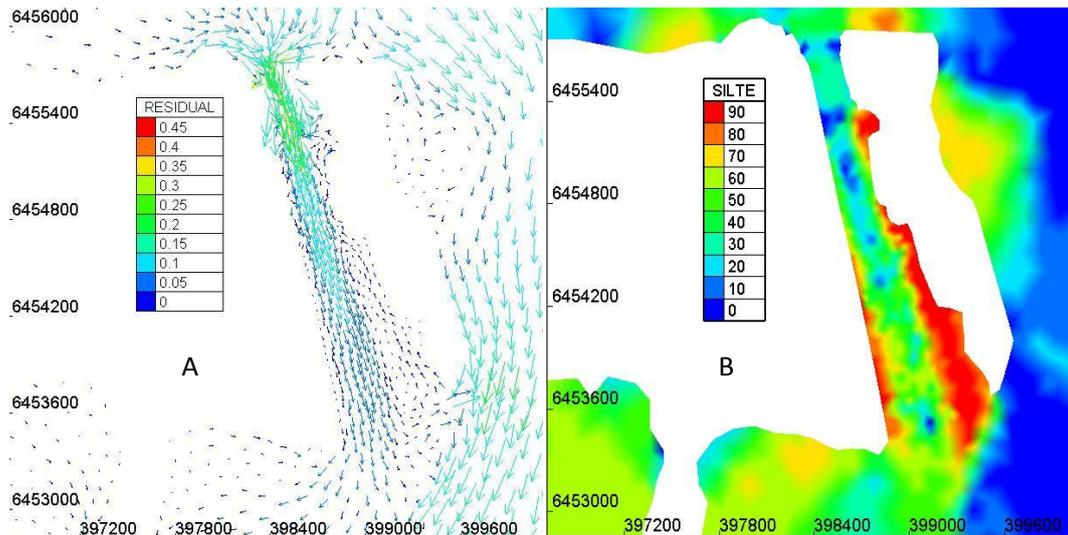


Figura 55: (A) Intensidade dos vetores de velocidade residual. (B) Porcentagem de silte depositado ao término da simulação.

5.8 – ESTUDO DE CASO: ESTRUTURA DE AJUSTE DE FLUXO

A simulação de uma estrutura (ou parede de deflexão) que ajuste o fluxo foi executada com o intuito de diminuir as taxas de assoreamento e deposição de sedimentos finos na área do Porto Novo. Foram levados em consideração o tamanho e inclinação desta estrutura dentro da malha de elementos finitos do modelo. Questões como forma, largura e material não foram consideradas.

Ao todo foram simulados 6 testes, dentre estes, 2 deles simulando barreiras na ponta da ilha (Figuras 25E e 25F), porém não houve resultados satisfatórios, ou seja, não apresentaram melhorias na sedimentação. Os testes restantes apresentaram uma estrutura paralela ao canal (Figuras 25A, 25B, 25C, 25D) simulando a presença de uma estrutura sólida de diferentes comprimentos. O teste que apresentou melhores resultados foi o que tornava a porção final do canal mais simétrica (Figura 56 ou 25A).

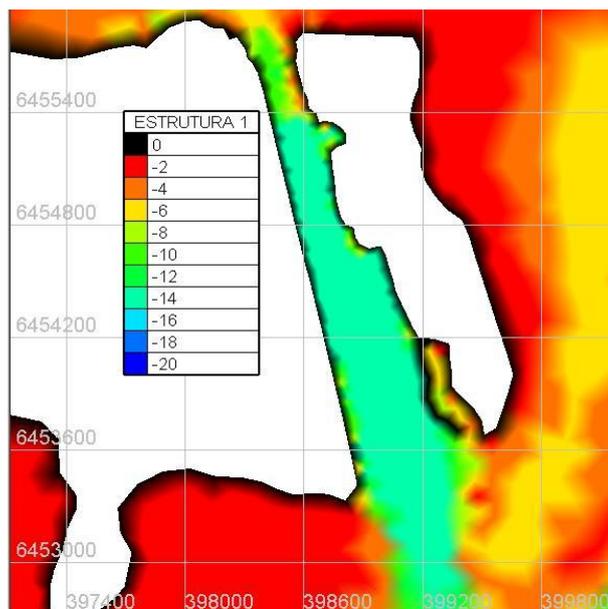


Figura 56 Estrutura de ajuste de fluxo na região do Porto Novo.

Para verificar a eficácia da utilização deste tipo de estrutura na redução da sedimentação do Porto Novo, é necessário analisar se as correntes sofrem os desvios esperados para evitar a formação das zonas de deposição. Essa verificação pode ser feita através da simulação de linhas de correntes (Figura 57). Os resultados apresentados mostram que durante ventos de SO (6 m.s^{-1} durante descarga baixa, após 53 dias) a estrutura consegue impedir que a corrente contorne a margem da ilha, evitando que ocorra sedimentação nos pontos ao redor da estrutura, direcionando o fluxo para dentro do canal.

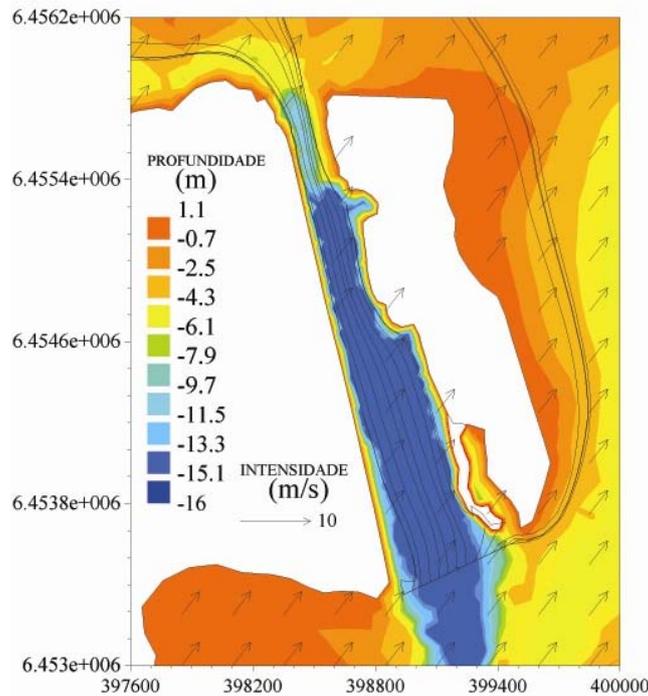


Figura 57: Representação da estrutura durante a ação de vento SO (6 m.s^{-1}), mostrando a alteração das linhas de fluxo na parte inferior do canal do Porto Novo.

5.8.1 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS MORFODINÂMICOS ENTRE OS CENÁRIOS

Com a finalidade de analisar as possíveis alterações nos resultados morfodinâmicos calculados para os dois cenários, a atual configuração e a estrutura proposta (Figura 54), é apresentada uma comparação entre os parâmetros indicadores da sedimentação na região do Porto Novo.

A diferença entre a porcentagem de fração silte depositada é apresentada na Figura 58. A comparação visual na porção inferior do canal, na margem oeste da Ilha do Terraplino, apresenta redução na deposição de silte na simulação com a estrutura de ajuste (Figura 58B). Ainda nesta região, não são observados pontos de deposição, o que sugere que esse sedimento é transportado para fora dessa área. Além disso, o canal apresenta menor sedimentação dessa fração, porém certa sedimentação na porção inferior do canal ainda persiste.

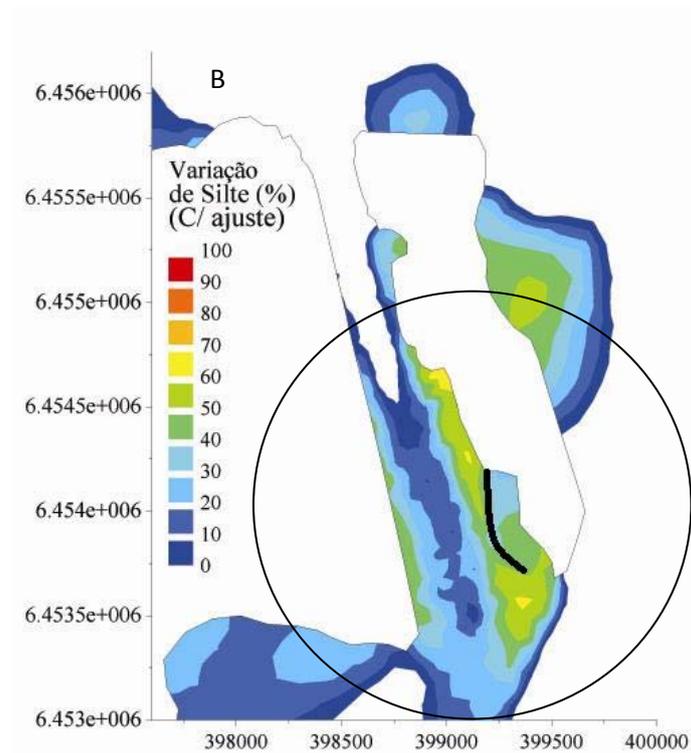
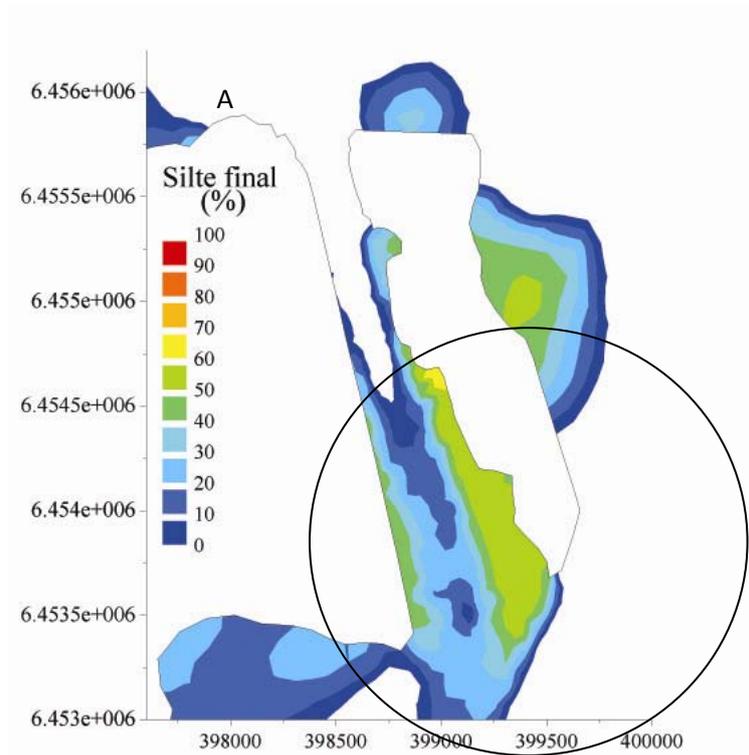


Figura 58: Comparação do padrão de deposição de silte na região do Porto Novo para os cenários (A) Cenário atual (B) Cenário com a estrutura.

Uma análise da série temporal do percentual de silte depositado para os pontos escolhidos (Figura 27) indica que em todos os pontos analisados a presença da estrutura promoveu uma redução no valor de deposição ao longo da simulação (Figuras 59, 60, 61), mas esta diferença é significativa somente em S1 (Figura 27).

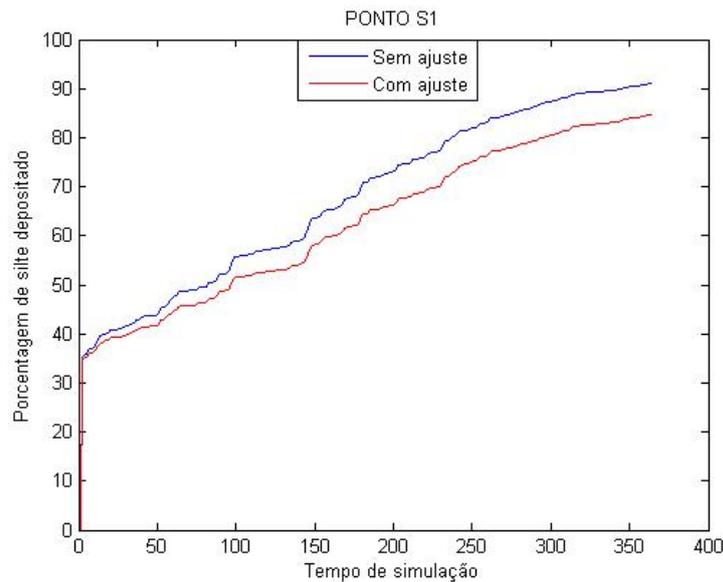


Figura 59: Comparação da deposição de silte no Ponto S1 Cenário atual (azul) Cenário com a estrutura (vermelho).

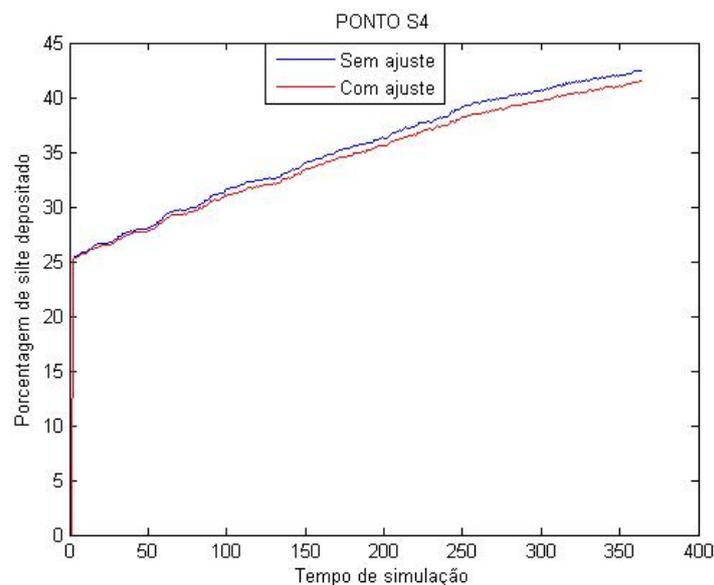


Figura 60: Comparação da deposição de silte no Ponto S4 Cenário atual (azul) Cenário com a estrutura (vermelho).

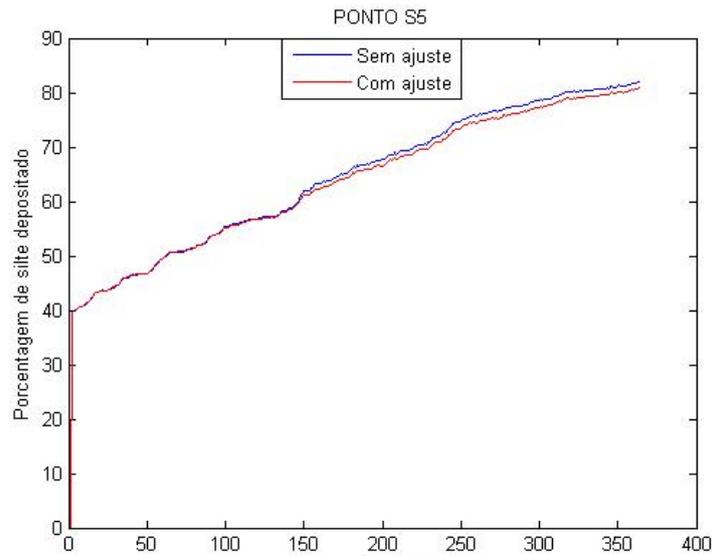


Figura 61: Comparação da deposição de silte no Ponto S5 Cenário atual (azul) Simulação com a estrutura (vermelho).

5.8.2 – FLUXOS DE DEPOSIÇÃO

A comparação dos fluxos de deposição entre os cenários é representada nas Figuras 62, 63, e 64. Os fluxos de deposição indicam que esse parâmetro sofreu uma redução em S1, e se conservou nos demais pontos durante o tempo simulado. Isso indica que no ponto S1 a velocidade foi modificada a ponto de reduzir esse fluxo de deposição, ou seja, o módulo da velocidade foi aumentado, conseqüentemente, houve um aumento na tensão de fundo, reduzindo a sedimentação. Este sofreu redução na sedimentação porque se tornou protegido da ação da corrente do canal, estando sujeito apenas aos fluxos de enchente. Os possíveis valores mais altos em casos isolados não comprometeram a sedimentação, que mostrou redução ao longo do tempo simulado.

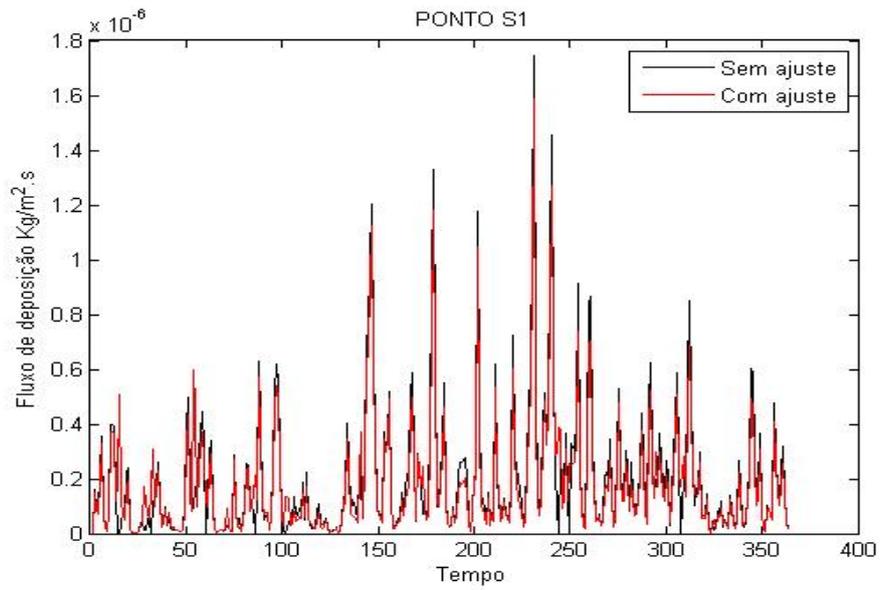


Figura 62 Comparação o Fluxo de deposição no Ponto S1 entre o cenário atual (preto) e a situação proposta com a estrutura (vermelho).

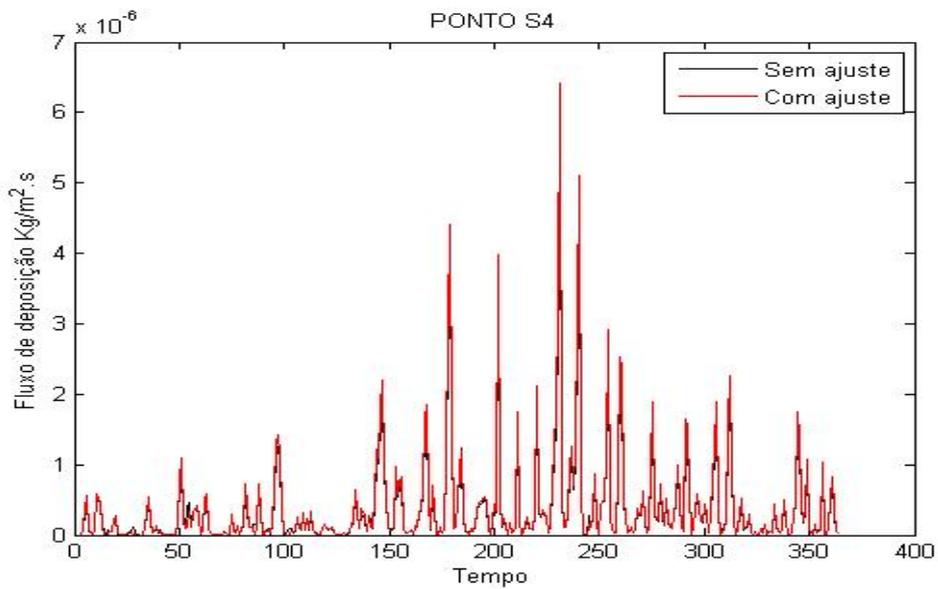


Figura 63: Comparação o Fluxo de deposição no Ponto S4 entre o cenário atual (preto) e a situação proposta com a estrutura (vermelho).

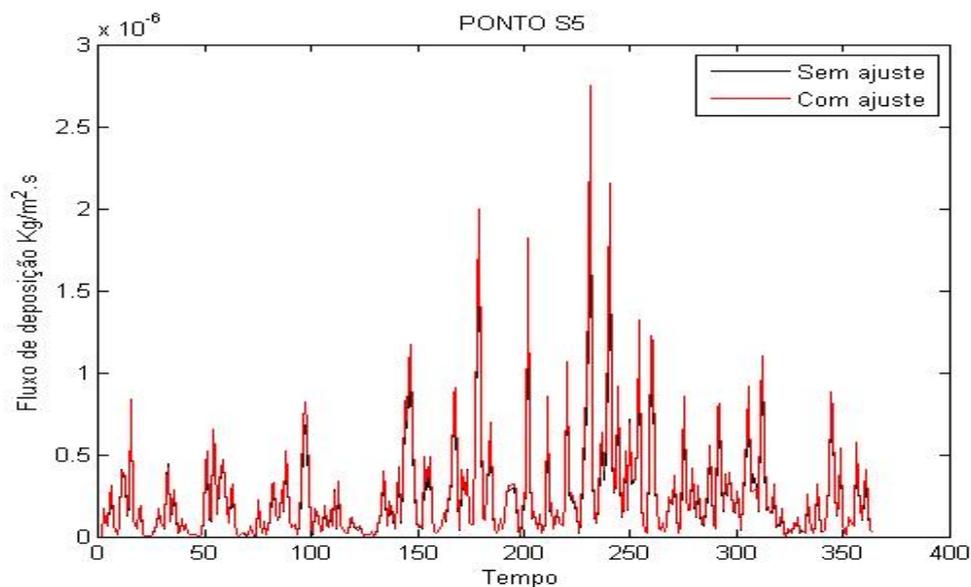


Figura 64: Comparação o Fluxo de deposição no Ponto S5 entre o cenário atual (preto) e a situação proposta com a estrutura (vermelho).

5.8.3 – ESPECTROS DE POTÊNCIA, ANÁLISE DE COERÊNCIA E FASE ENTRE OS CENÁRIOS

A comparação dos espectros de potência, análise de coerência e fase entre as duas situações é apresentada nas figuras 65, 66 para o ponto S1. Esse ponto foi escolhido por estar localizado em uma área rasa. Por ser um modelo bidimensional, analisar essas forçantes em regiões mais profundas do canal induziria a resultados limitados, ao não considerar a estratificação e velocidade vertical como fatores contribuintes a sedimentação.

Para o ponto S1 (Figura 65), as bandas de frequência relativas a passagens de vento e a descarga fluvial sofreram decréscimo no seu nível energético o que indica que a estrutura reduz o efeito da sedimentação ao alterar a hidrodinâmica, portanto a descarga e passagens de frentes ainda controlam o fluxo de deposição, dentro do nível de significância (vermelho) e variação da velocidade, porém com menor intensidade.

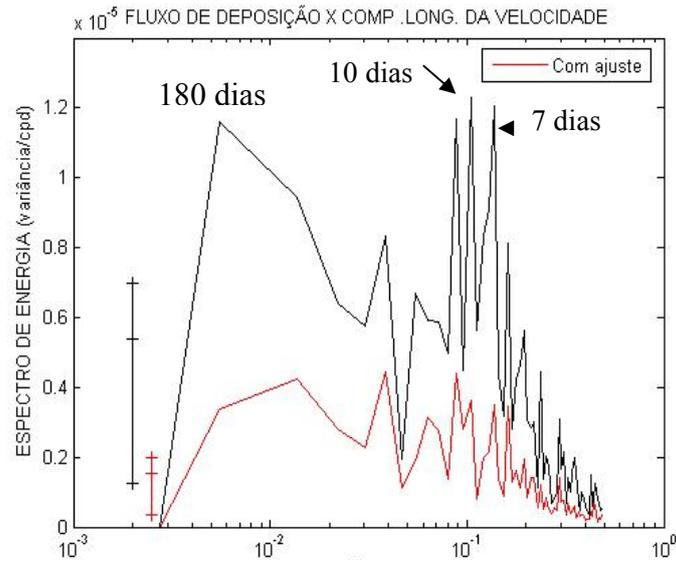


Figura 65: Comparação entre os espectros cruzados de potencia entre a simulação original (preto) e a situação proposta com a estrutura (vermelho) para o ponto S1.

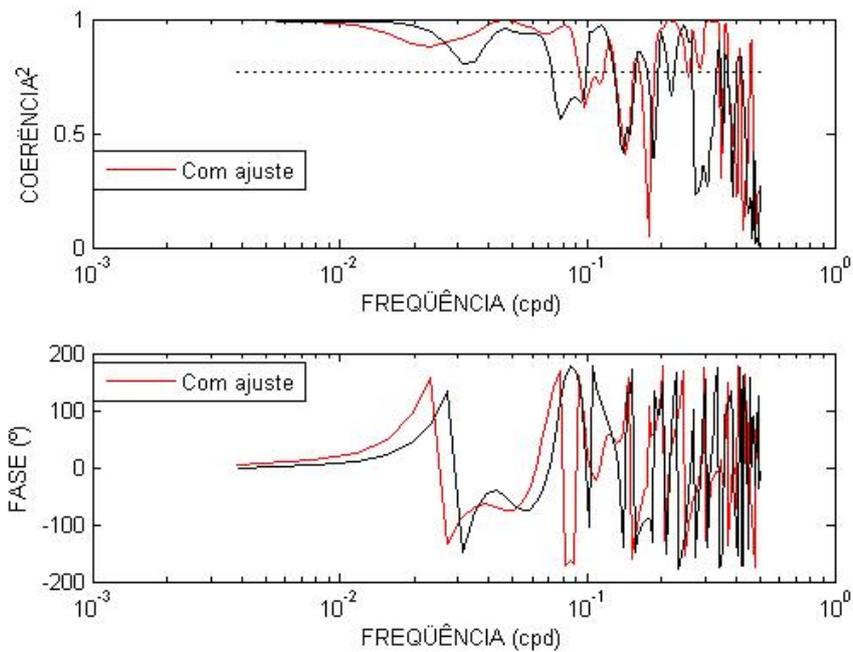


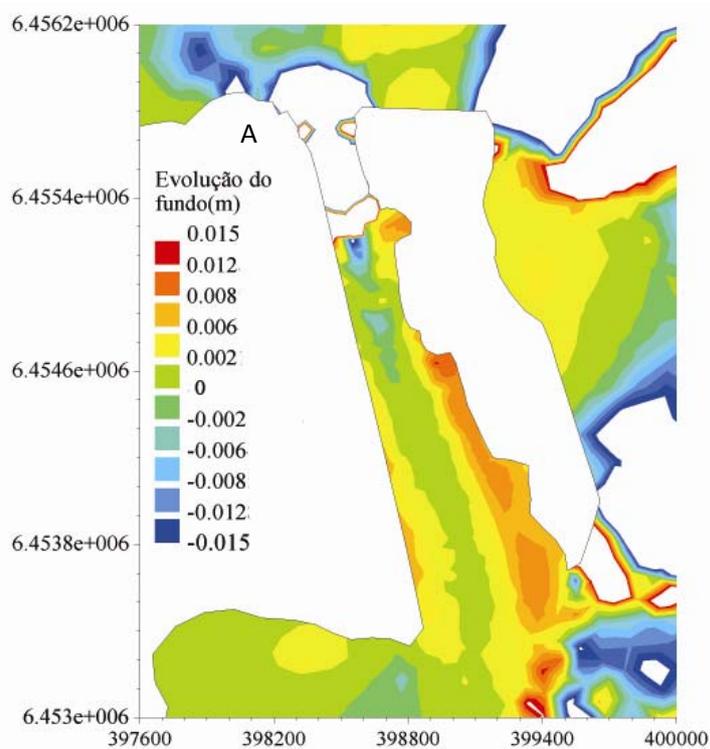
Figura 66: Comparação entre os espectros cruzados de potencia entre a simulação original (preto) e a situação proposta com a estrutura (vermelho).

A comparação da análise de coerência para o fluxo de deposição e a componente longitudinal (Figura 66) mostra que as séries temporais dos dois cenários (acima da

linha preta) ainda são coerentes nas bandas de frequência do vento e da descarga, ou seja, ainda apresentam uma relação linear entre eles, no entanto, com menor nível de coerência. A análise do espectro de fase mostrou que as séries temporais permanecem em discordância de fase, o que é esperado para essa situação.

5.8.4 – EVOLUÇÃO DO FUNDO

Uma comparação qualitativa entre os dados de evolução do fundo (Figura 67) indica que houve redução na sedimentação em pontos localizados na margem leste do canal. No canal, houve uma mudança em relação ao assoreamento no centro do canal (identificado pela porção verde na figura). No cenário com a estrutura (Figura 67B), o canal sofre menor evolução (comprovada pela largura da porção verde), indicando não ser esperada a evolução do fundo.



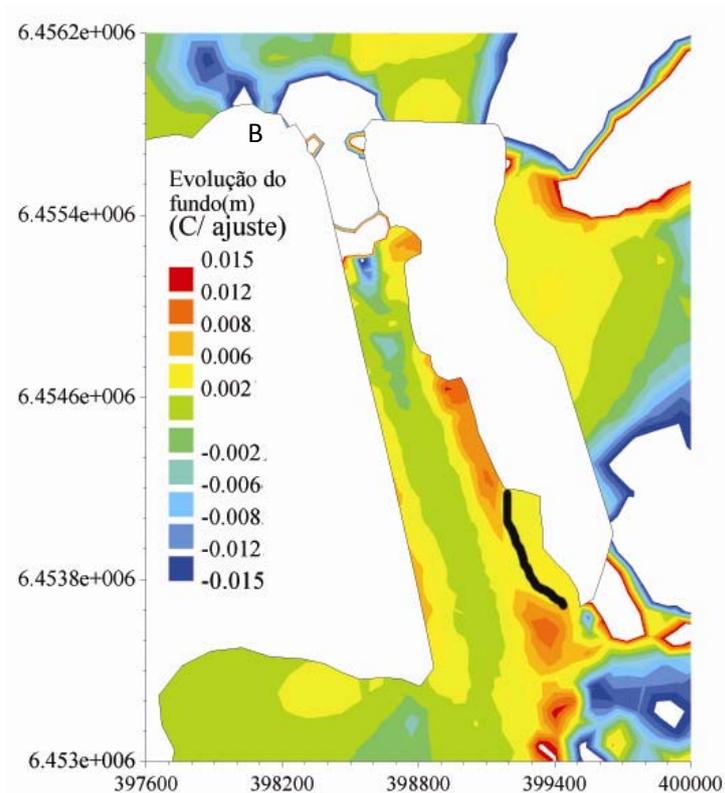


Figura 67: Comparação nos dados de evolução do fundo na região do Porto Novo entre os cenários (A) Cenário atual (B) Cenário com a estrutura.

A análise pontual dos dados de evolução do fundo confirma a diminuição da sedimentação. No caso do ponto S4, localizado no meio da porção final do canal do Porto Novo, não houve mudança, indicando que não houve comprometimento na sedimentação nesse ponto. Assim, os pontos analisados, sofreram redução ou não apresentaram evolução (Figuras 68, 69, 70).

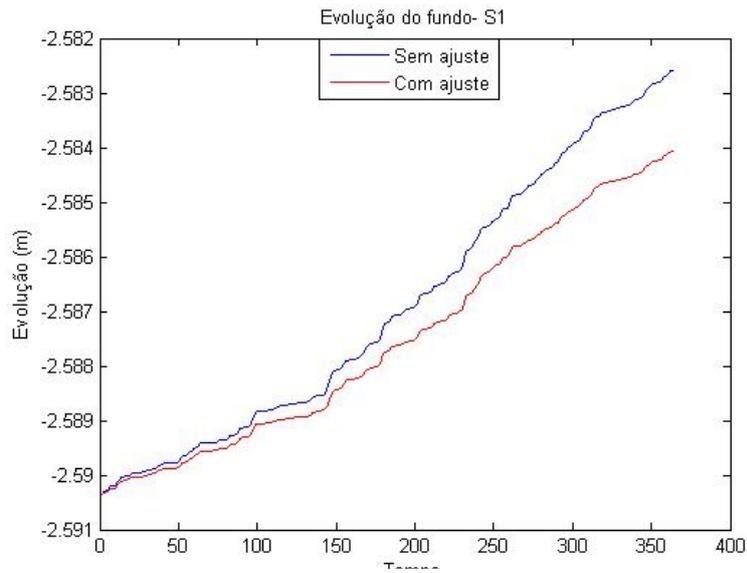


Figura 68: Comparação da evolução entre os dois cenários no ponto S1.

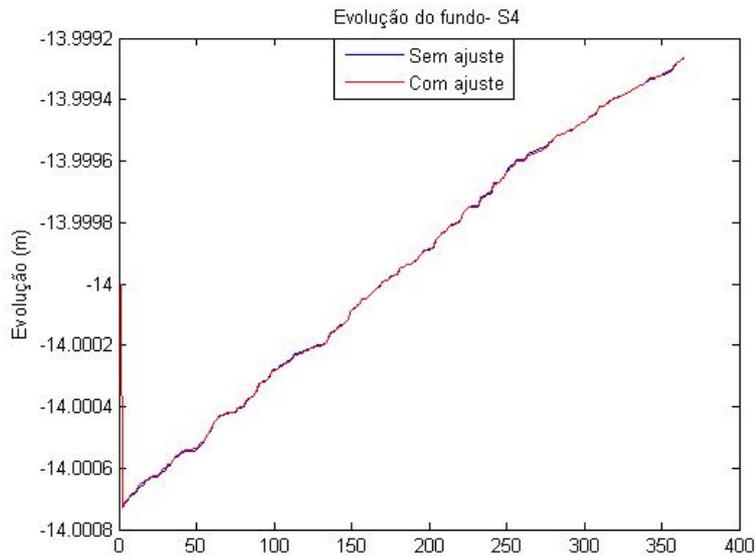


Figura 69: Comparação da evolução entre os dois cenários no ponto S4.

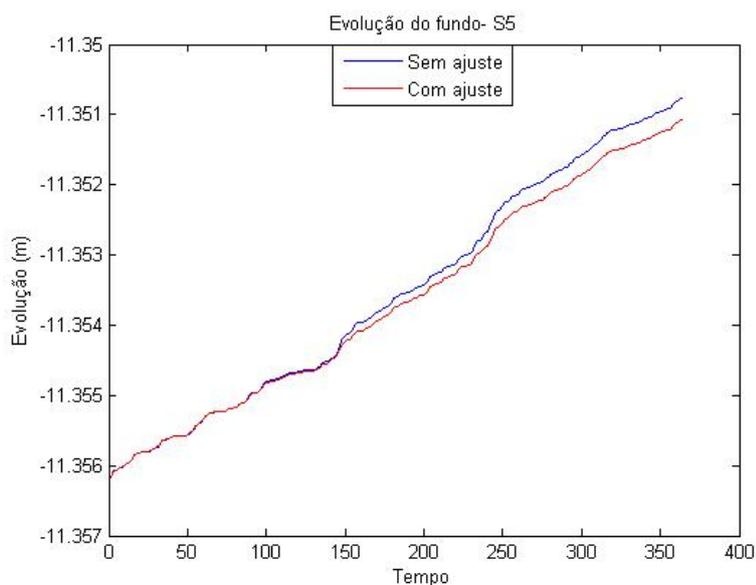


Figura 70: Comparação da evolução entre os dois cenários no ponto S5.

A comparação dos dados indica que o ajuste feito na região do canal do Porto Novo reduziu os parâmetros morfodinâmicos. A Tabela 8 apresenta a diferença na porcentagem de acúmulo de silte, enquanto que a Tabela 9 apresenta a diferença na evolução do fundo para as duas situações nos pontos escolhidos. Os valores baixos da evolução do fundo não englobam a floculação, cujo processo contribui para a deposição de sedimentos.

Tabela 9: Diferença do silte acumulado nos dois cenários.

Pontos	Silte Depositado (%) (Sem ajuste)	Silte Depositado (%) (Com estrutura)	Diferença (%)
S1	91,04	84,69	5,35
S4	42,46	41,46	1
S5	82,08	80,8	1,28

Tabela 10: Diferença na evolução do fundo nos dois cenários.

Pontos	Evolução do fundo (m) (Sem ajuste)	Evolução do fundo (m) (Com estrutura)	Diferença (%)
S1	0,007777	0,006291	20
S4	0,000732	0,000732	0
S5	0,005403	0,00509	6

Os resultados mostraram que a alteração na hidrodinâmica local diminui as taxas de sedimentação, ainda que alguns fatores não sejam considerados nesse estudo. O modelo 2D apresenta algumas limitações que só podem ser resolvidos com o auxílio de simulações em três dimensões. Correntes de densidade, relacionadas com a variação de densidade e temperatura, e estratificação não são consideradas, além do transporte de fundo. Em vista disso, os efeitos da sedimentação não podem ser totalmente quantificados. No entanto, simulações bidimensionais trazem respostas mais rápidas no que diz respeito a possíveis alterações nas condições hidrodinâmicas e sedimentares na região do Porto Novo.

6 – DISCUSSÕES

A hidrodinâmica do estuário da Lagoa dos Patos já foi amplamente estudada no que diz respeito do papel das principais forçantes, seja através de modelos numéricos ou de dados de campo. Möller *et al* (1996) já citavam a influência da descarga na Lagoa dos Patos no estuário e na região costeira adjacente. O efeito do vento foi bem detalhado por Möller *et al* (2001) que utilizaram modelos numéricos que demonstravam o efeito dos ventos NE e SO na entrada e saída de água na porção estuarina. Fernandes *et al* (2002) analisaram a hidrodinâmica da Lagoa dos Patos durante um evento de El Niño. Porém, trabalhos que envolvem modelagem numérica juntamente com processos de transporte de sedimentos no estuário da Lagoa dos Patos são escassos. As principais limitações para estudo de processos sedimentares através de modelos numéricos são os dados necessários para sua validação. Dados contínuos de material em suspensão na região são raros devido ao tamanho do estuário e sua variabilidade espacial e temporal.

Para o presente trabalho, é essencial que a hidrodinâmica do estuário da Lagoa dos Patos seja bem representada, pois essa irá influenciar no padrão de circulação na área do Porto Novo, que corresponde a uma circulação de escala local.

A estrutura da circulação de escala local de um estuário já foi objeto de vários estudos. Jones & Davies (2006) utilizaram os resultados do TELEMAC2D para comparar com resultados de modelos de diferenças finitas na região do Mar Irlandês. O modelo em elementos finitos consegue representar melhor a circulação onde apresenta fluxo bidirecional bem detalhado ao simular o efeito do vento e da maré na desembocadura de rios. Semelhante a essa situação, o refino na região do Porto Novo se torna essencial para compreensão da circulação, pois apresenta um padrão de comportamento na transição da direção do vento, onde ocorrem zonas de recirculação de baixos valores de velocidade, fator responsável pela sedimentação.

Estudos de modelagem numérica do transporte de sedimentos têm sido efetuados por diversos autores em outras regiões. Ferrarin et al (2008) validaram um modelo hidrodinâmico 2D de ondas e correntes com transporte sedimentar para a laguna Venice, França, através de testes em laboratório e intensas medidas em campo apresentando alta correlação entre os dados do modelo e o ambiente em questão. Liu *et al* (2008) aplicaram um modelo de elementos finitos 2D acoplado a um módulo de transporte de sedimentos no estudo da estabilidade de uma estrutura sujeita a erosão, onde concluiu que modelos 2D podem fornecer avaliações mais rápidas, quando comparadas a modelos 3D, dos processos hidrodinâmicos e sedimentares, onde indicam as tendências deposicionais no ambiente em questão. Nicholson et al, (1997), fizeram comparações de diversos modelos e concluiu que esse enfoque deveria ter auxílio de um modelo 3D para resultados mais precisos. Porém, essas simulações requerem um alto custo computacional, tornando as simulações mais longas.

O estudo de estruturas para amenizar os efeitos da sedimentação em áreas de interesse, principalmente em zonas costeiras e portos, envolve as ondas como principal agente (Silva et al, 2001; Sánchez-Badorrey et al, 2008). As interações de trens de ondas novas e refletidas modificam o padrão de sedimentação os quais são dependentes dos dois possíveis tipos de transporte: suspensão ou de fundo, esse último pode comprometer a base, gerando instabilidade na estrutura. Essas estruturas devem ser levadas em conta na operacionalidade dos canais de entrada, principalmente, estar ciente das possíveis conseqüências para a navegação. Além disso, estruturas (quebra-mares, molhes, paredes) mal planejadas tendem a gerar maiores problemas com relação à sedimentação (Sánchez-Badorrey et al, 2008).

Possivelmente, os estudos feitos por Winterwerp (2005) e Kuijper et al (2005) são os mais significativos no que diz respeito à redução das taxas de assoreamento em

áreas portuárias. Esses trabalhos descrevem uma metodologia detalhada da construção de estruturas que ajustam as correntes de modo que a deposição seja reduzida e um estudo de caso relacionado ao Porto de Hamburgo é apresentado. Essa metodologia foi desenvolvida por uma década e pode ser utilizada em vários ambientes como lagoas rasas, rios e estuários, respeitando as suas particularidades.

O processo físico que atua na circulação da região do Porto Novo de Rio Grande e do Porto de Hamburgo (Figura 71) é semelhante, sendo conhecido na mecânica de fluidos como o princípio da separação de fluxos (Figura 72). A constante medição das taxas de assoreamento ao longo do tempo comprovou a eficácia dessa técnica, apresentando redução dessas taxas (Kuijper *et al*, 2005).



Figura 71: Parede de deflexão de correntes instalada no Porto de Hamburgo (Kuijper *et al*, 2005).

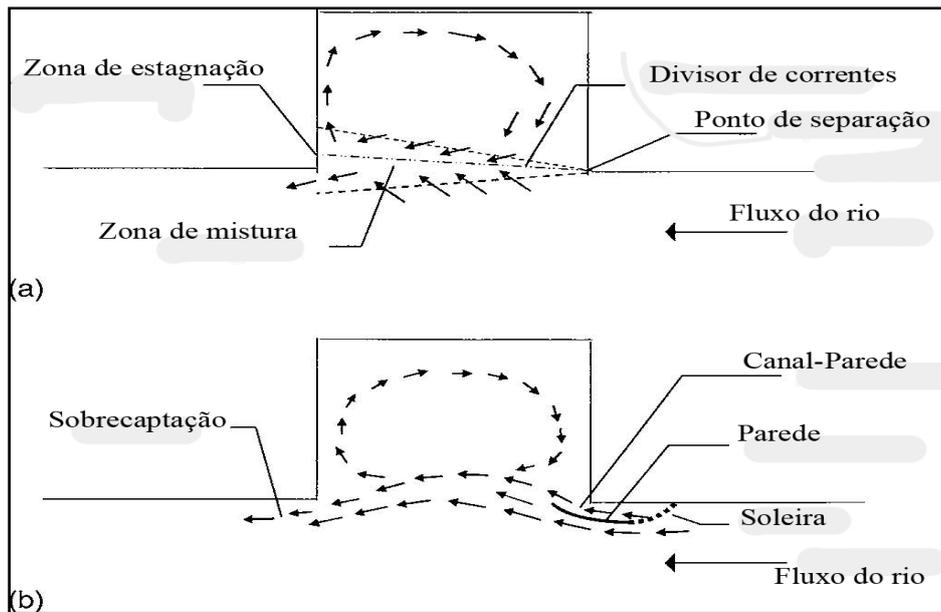


Figura 72: Representação esquemática do projeto: (a) sem parede (b) com parede. Adaptada de Kuijper *et al* (2005).

Segundo Allen (1970), essa separação ocorre onde uma camada limite se separa de uma superfície sólida e entra no principal corpo do fluido como uma camada livre de cisalhamento. Portanto, é comum que essa camada seja reincorporada ao limite sólido em algum ponto do fluxo abaixo do ponto de separação, originando giros ou vórtices, denominados “bolhas de separação”. O estudo de fluxos de separação é importante no estudo de diversas estruturas sedimentares, fornecendo o possível comportamento do fluido perante a presença de um obstáculo. Na figura 72, o fluxo se desprende do contorno e forma um giro dentro da área quadrada recuada, aprisionando águas nessa região. Esse mecanismo foi identificado como o responsável pelas altas taxas de deposição de sedimentos no porto de Hamburgo.

No caso da área do Porto Novo do Porto de Rio Grande, a Ilha do Terrapleno funciona como uma obstrução ao fluxo e pode ser comparada a situação apresentada na figura 73. O esquema apresenta um fluxo de baixa velocidade ao redor de uma esfera. Nessa situação, as células de recirculação se formam fluxo abaixo (Allen, 1970).

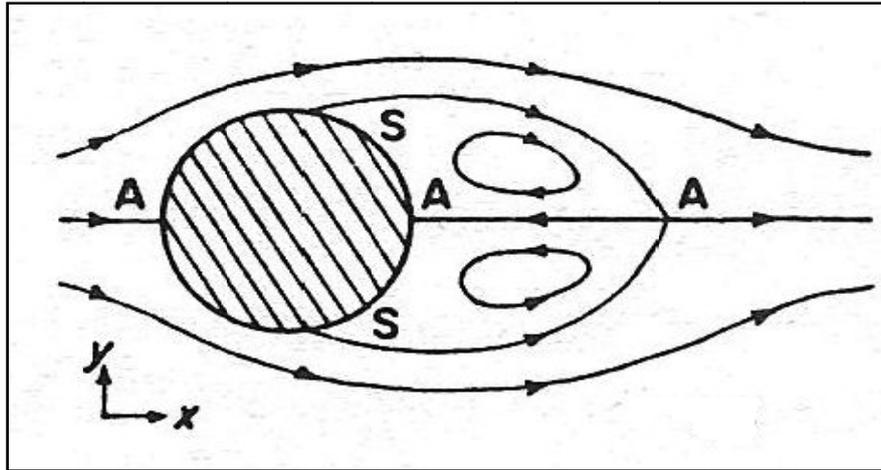


Figura 73: Representação esquemática da separação de fluxos. (A- Ponto de junção (attachment point), S- Ponto de separação (separation point)).

No caso da margem oeste da Ilha do Terrapleno, a sua forma irregular gera outras “bolhas de circulação” (Figura 74). Essas zonas foram caracterizadas pelos vetores de velocidade e pelos gráficos de linhas de corrente. Essa circulação tem velocidade menor que a do fluxo e serve de mecanismo para a deposição de sedimentos finos. Devido à frequência maior da situação de vazante, o ponto de separação fica localizado ao norte da ilha (figura), e durante seu progresso, as irregularidades da margem oeste permitem que sedimentos finos depositem na área do Porto Novo.

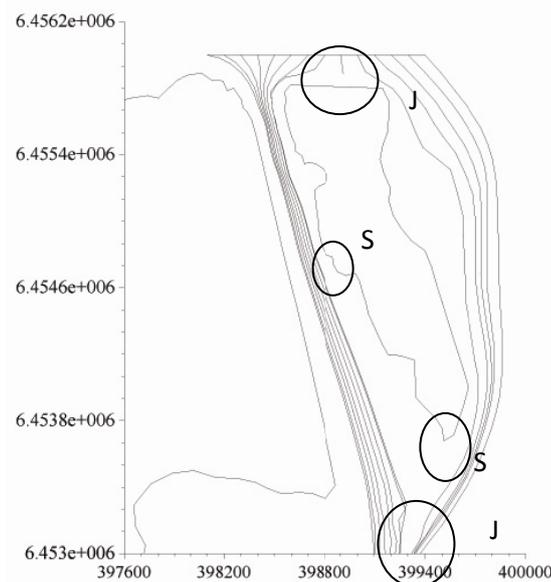


Figura 74 Analogia da figura de Allen (1970) para a região do Porto Novo. (J-Ponto de junção; S- Ponto de separação.)

A Ilha do Terraplano apresenta um ponto de junção da corrente à ilha na sua porção norte. Este ponto está relacionado com a descarga proveniente do interior da lagoa, que é a maior fonte de sedimentos, e o predomínio de fluxos de vazante. Porém, à medida que entra no canal do Porto Novo, a velocidade perde intensidade (Figura 40). A variação da batimetria associada às variações na intensidade da corrente local, combinadas com a passagem de frentes frias e variação da descarga fluvial, são os principais fatores para o aprisionamento de águas na porção sul da Ilha do Terraplano. A consequência dessa hidrodinâmica peculiar na região do Porto Novo é a ocorrência de sedimentação concentrada na porção sul do canal de navegação, representada pela deposição da fração silte e pela evolução do fundo fornecidos pelo modelo.

A análise dos fluxos de deposição em todos os pontos apresentou um padrão de picos relacionados à passagem de frentes e o aumento da descarga, o que significa que esses fluxos responderão em escalas curtas de tempo associadas à atuação dos ventos. Esse efeito é intensificado pelo aumento da descarga que contribui com o fornecimento de sedimentos. O fluxo só ocorre a partir de uma condição específica de intensidade da corrente. Quando a tensão crítica de deposição é inferior a $0,02 \text{ N/m}^2$ o sedimento deposita. Essas condições são mais frequentes no ponto S1. Para a área correspondente ao ponto S1 foi feita uma análise de espectro cruzado entre a componente longitudinal e os fluxos de deposição. Essa componente é a mais importante devido à orientação do canal. A análise do espectro cruzado mostra que a passagem de frentes frias influencia na frequência de deposição, enquanto que a intensidade do fluxo de deposição é a resposta da variação da intensidade da descarga fluvial. Esses eventos estão coerentes, ainda que apresentem um pequeno atraso de fase. Os resultados das análises de EOF corroboram essa afirmação, pois mostram a modulação do fluxo ao inferir que o fluxo de deposição sofre modulação da descarga.

Para diminuir a sedimentação, é proposta uma estrutura que auxilie a hidrodinâmica no local a reduzir as condições favoráveis à sedimentação. Dentre os testes executados, o melhor resultado foi aquele que representava uma ilha mais simétrica. A finalidade da estrutura é fazer com que o sedimento não desacelere, fazendo com que ele se mantenha em movimento, pois o assoreamento ocorre o ambiente perde capacidade de transportar sedimentos, que deposita nos canais de navegação.

A comparação dos indicadores de circulação e de sedimentação entre os cenários apresentam razoável melhoria nos aspectos deposicionais na região do Porto Novo. As regiões onde há maior deposição sofreram redução na deposição de sedimentos finos. A estrutura aumentou a velocidade do canal, diminuindo os fluxos de deposição dos pontos analisados (principalmente S1). A evolução do fundo também apresentou melhorias ou não apresentou mudanças bruscas a ponto de deslocar pontos de sedimentação. Os espectros cruzados entre as duas situações mostram um decréscimo no seu nível energético nas bandas de frequência relacionadas à passagem de frentes frias e à descarga, com uma inversão, embora pequena, de fase. Essa análise não poderia ser feita na região do canal, pois essa região pode sofrer efeitos de estratificação os quais não são vistos em modelos 2D.

O estuário da Lagoa dos Patos varia de cunha salina a parcialmente misturado. Segundo Winterwerp (2001), a floculação é responsável pela formação de agregados de sedimentos coesivos através de movimentos turbulentos. Desse modo, as cargas de sedimento de fundo não podem ser simuladas. Como o modelo 2D apresenta a salinidade apenas como traçador e a velocidade é integrada na vertical, esta não influencia na deposição de sedimentos, sendo influenciada apenas pelo cisalhamento de fundo e fluxo de deposição. Ferrarin *et al* (2008) ressaltam que os resultados de

modelos de transporte de sedimento acoplados em modelos 2D apresentam melhores resultados pra estuários bem misturados. Em estuários de cunha salina ou parcialmente misturados, a quantificação dos processos se torna menos precisa. Os resultados das simulações mostraram que a alteração na hidrodinâmica pode diminuir as taxas de deposição.

Devido às suas limitações, os resultados do modelo apresentaram valores discrepantes no período de maior sedimentação, o qual mostrou que o inverno é o período de maior deposição, com relação à tabela 1. Por ser um modelo bidimensional, não são consideradas as variações no campo de densidade (estratificação), assim, a salinidade e a temperatura não agem nos sedimentos, sendo influenciando apenas pela hidrodinâmica. Isso é mostrado nos fluxos de deposição que tem seu valor aumentado durante o período de descargas altas. Além disso, é usada a lei de Stokes, que é a lei de deposição de sedimentos não-coesivos, e a ausência de um modelo de consolidação impede que os processos de deposição no canal sejam visualizados, portanto, apenas os processos erosivos podem ser visualizados.

Entretanto, os resultados deste trabalho mostram que o modelo conseguiu representar bem a simulação de uma estrutura que ajuste a corrente de modo que a diminuir a deposição de sedimentos na área do Porto Novo, porém a carga de sedimento no fundo necessita de maiores investigações. A variabilidade da estrutura da coluna d'água da Lagoa dos Patos, mais precisamente no Porto Novo, mostra que simulações 3D são importantes para a compreensão total dessa circulação responsável pela deposição.

7 – CONCLUSÕES

Em vista do que foi apresentado, as principais conclusões deste trabalho são:

- A hidrodinâmica da região do Porto Novo responde da mesma forma que o estuário no que diz respeito aos efeitos da descarga e da ação dos ventos, sendo bem representada pelo modelo TELEMAC2D;
- A hidrodinâmica desta região é caracterizada por células de recirculação, que apresentam velocidades baixas e tendência a deposição;
- A deposição de sedimentos finos depende da variação no campo de velocidade, principalmente em áreas mais rasas, como as margens da Ilha do Terrapleno e a margem correspondente à cidade de Rio Grande. O fluxo de deposição acompanha o comportamento da descarga dos rios;
- A estrutura de ajuste de correntes é capaz de aumentar a velocidade do fluxo, conseqüentemente aumenta a turbulência e diminui o fluxo de deposição nos pontos analisados. Isso implica em diminuir a evolução do fundo nos canais e em áreas de interesse do Porto de Rio Grande. Desse modo, uma possível modificação na configuração da estrutura na Ilha do Terrapleno implicará em um ajuste hidrodinâmico;

Como conclusão geral do trabalho, pode-se afirmar que o modelo representa satisfatoriamente a circulação de pequena escala da região do Porto Novo, bem como seus processos sedimentares. Assim, é proposta uma alteração na configuração da ilha com a finalidade de reduzir o assoreamento a partir da correção da hidrodinâmica local. Para isso, o uso de modelos numéricos figura como uma alternativa de alta eficiência e baixo custo para simular o e feito deste tipo de obra sobre a hidrodinâmica do ambiente.

8 - BIBLIOGRAFIA

- ALLEN, J.R.L. 1970. *Physical Processes of Sedimentation*. George Allen & Unwin. London. 248 p.
- ALVARES, J.A; MARTINS, I.R; MARTINS, L.R. 1981. Estudo da Lagoa dos Patos. Pesquisas. Instituto de Geociências da UFRGS. Porto Alegre, v.14, p. 41-66.
- ANTIQUERA, J. A. F., CALLIARI, L. J. 2006: Geomorphologic evolution of a sand spit located in the mouth of a choked coastal lagoon. Lagoa dos Patos: Southern Brazil. *Journal of Coastal Research*, v. 39, p. 255-258, 2006.
- ASMUS, M. L. 1997. Coastal Plain and Patos Lagoon. In: *Subtropical Convergence Environments - The Coast and Sea in the Southwestern Atlantic*. Eds. U. Seeliger, C.Odebrecht, and J. P. Castello. pp. 9-12. Springer Verlag.
- BEMVENUTI, C. M., ANGONESI, L. G., GANDRA, M. S. 2005. Effects Of Dredging Operations On Soft Bottom Macrofauna In A Harbor In The Patos Lagoon Estuarine Region Of Brazil. *Brazilian Journal of Biology*. V .65, n. 4, p. 573-581.
- BRAGA, M. F. S., N. KRUSHE, 2000: Padrão de ventos em Rio Grande, RS, no Período de 1992 a 1995. *Atlântica*, 22, 13_26.
- BRYANT, T.J, MOSELEY, M.D. 2007 A Potential Alternative to Berth Maintenance Dredging. *Ports* 2007.
- CALLIARI, L.J. 1980: Aspectos sedimentológicos e ambientais na região estuarial da Lagoa dos Patos. Dissertação de Mestrado, UFRGS.
- CALLIARI, L. J. & FACCHIN, S. 1993. Laguna dos Patos: Influência nos depósitos lamínicos costeiros. *Pesquisas* 20, 57-69.
- CASTELLO, J.P.(1985). La ecología de los consumidores del estuário de la Lagoa dos Patos, Brazil. In: *Fish Community Ecology in Estuaries and Coastal Lagoons: Towards an ecosystem integration* (Ed. A.Yanes-Arancibia). DR(N) Unan Press, Mexico: 386-406.
- CLARK, J,E. 1977. *Coastal Ecosystem Management (A technical manual for the conservation of coastal zone resources)*. New York, Wiley and Sons. 988p.
- CLOSS, D. 1962. Foraminíferos e tecamebas da Lagoa dos Patos (RGS). *Boletim da Escola de Geologia* 11:1-51.
- COLARES, L.L. 2007. Comportamento da Pluma de Sedimentos das Áreas de Descarte do Porto de Rio Grande. Monografia. Universidade Federal do Rio Grande.
- COSTA, R. L. 2005. Estudo da influência da obra de convergência dos Molhes da Barra de Rio Grande sobre a circulação hidrodinâmica do Estuário da Lagoa dos Patos. Monografia. Universidade Federal do Rio Grande.

DELANEY, P. 1965: Fisiografia e geologia de superfície da planície costeira do Rio Grande do Sul. Publicação Especial da escola de Geologia de Porto Alegre 6:1-105.

DIBAJNIA, M., NAIRN, R.B., ROSS, 2004 P. Analysis of long-term sand accumulation data harbor using a 2HD numerical simulation. *Coastal Engineering* 51, 863-882.

EMERY, W.J., THOMSON, R.E. 1998. Data Analysis Methods in Physical Oceanography. First edition; Library of Congress Cataloging in Publication Data. Pergamon.

FERNANDES, E. H. L. 2001. Modelling the Hydrodynamics of the Patos Lagoon, Brasil. Tese de doutorado. University of Plymouth, 198 p.

FERNANDES, E.H.L., DYER, K.R. AND NIENCHESKI, L.F.H. 2001: TELEMAC-2D calibration and validation to the hydrodynamics of the Patos Lagoon (Brazil). *Journal of Coastal Research* 34, 470-488.

FERNANDES, E.H.L., DYER, K.R. MÖLLER, O.O. NIENCHESKI, L.F.H. 2002. The Patos Lagoon hydrodynamics during El Niño event (1998). *Continental Shelf Research*. v. 22. p. 1699-1713.

FERNANDES, E.H.L., MARIÑO-TAPIA, I., DYER, K.R., MOLLER, O.O. 2004: The attenuation of tidal and subtidal oscillations in the Patos Lagoon estuary. *Ocean Dynamics* 54 (3-4), 348-359.

FERNANDES, E.H.L.; DYER, K.R., MOLLER, O.O. 2005. Spatial Gradient in the flow of southern Patos Lagoon. *Journal of Coastal Research*. v. 21 n. 4. p. 759-769.

FERNANDES, E.H.L.; MONTEIRO, I.O., MÖLLER, JR., O.O, 2007. On the Dynamics Bay – Patos Lagoon (Brazil). *Journal of Coastal Research*. v. 47. p. 96-106.

FERNANDES, E.H.L., MARQUES, C.W. MONTEIRO, I.O., GONÇALVES, C.R. 2008. Estudo hidro e morfodinâmico de alterações do canal de acesso ao Porto de Rio Grande, Porto Novo e Terminal de São José do Norte. Programa de Monitoramento Ambiental do Porto de Rio Grande. 64 p.

FERRARIN, C., UMGIESSER, G., CUCCO, A., HSU, T.W., ROLAND, A., AMOS. 2008. Development and validation of a finite element morphological model for shallow water basins. *Coastal Engineering*. V. 55, n 9. 716-731p.

FITZGERALD, D.M., KNIGHT, J. 2005. High Resolution and Sedimentary Evolution of *Estuaries*. Ed. Springer. 1-11p.

GARCIA, C.A.E. 1997. Hydrographic Characteristics. In: Seeliger, U., Odebrecht, C., Castello, J.P.(Eds). Subtropical convergence environments – The Coast and sea in the Southwestern Atlantic. Springer, Berlin, p. 18-20.

GHOSH, L.K; PRASAD, V.B; JOSHI, KUNTE, S.S. A study on siltation in access channel port. *Coastal Engineering*, v. 30, p. 59-74 (2001).

GONÇALVES, R.C. 2007. Modelagem Numérica da Morfodinâmica da lagoa dos Patos. Monografia apresentada à banca examinadora da Universidade Federal do Rio Grande, como exigência parcial da obtenção do grau de Bacharel em Oceanologia.

HARTMANN, C., CALLIARI, L. J. 1995: Composição e Qualidade do Material em Suspensão Durante Alta Turbidez na Extremidade Sul da Laguna dos Patos, Rs. *Revista Pesquisas*.

HARTMANN, C. 1996. Dinâmica, distribuição e composição do material em suspensão na região sul da Laguna dos Patos, RS. Tese de doutorado. 363p.

HERVOUET, J. M. & VAN HAREN. 1996. Recent advances in numerical methods for fluid flows. In: *Floodplain Processes*. Eds. M. G. Anderson, D. E. Walling, and P. D. Bates. pp. 183-214.

HERZ, R. 1977. Circulação das águas de superfície da Lagoa dos Patos. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Brasil.

JONES, E., DAVIES, A.M. 2005. An intercomparison between finite difference and finite element (TELEMAC) approach to modeling west coast of Britain tides. *Ocean Dynamics*. v. 55. p. 178-198.

JONES, E., DAVIES, A.M. 2006. Application of a finite element model (TELEMAC) to computing the wind induced response of the Irish Sea. *Continental Shelf*. v.26. p. 1519-1541.

JONES, E., DAVIES, A.M. 2007. A high-resolution finite element model of the M2, M4, M6, S2, N2, K1, O1 tides off the west coast of Britain. *Ocean Modelling*. 19(1-2), p. 70-100.

KJERFVE, B. 1986. Estuarine Variability. Ed Academic Press p 63-81.

KJERFVE, B. 1994. Coastal Lagoon Process. Ed. Elsevier Science. P. 577.

KJERFVE, B., MAGILL, K.E. 1989. Geographic and Hydrographic Characteristics of Shallow Coastal Lagoons. *Marine Geology* 88:187-199.

KNOPPERS, B., KJERFVE, B. 1999. Coastal lagoons of southeastern Brazil: physical and biogeochemical characteristics. In: *Estuaries of South America - Their Dynamics and Geomorphology*. Eds. G. M. Perillo, M. C. Piccolo, and M. Pino-Quivira. SpringerVerlag. pp. 35-66.

KRONE, R.B. 1962: Flume Studies of the Transport of Sediment in Estuarial Processes. Final Report Hydraulic. Eng. Lab. Sanit. Eng. Res. Lab. University of California, Berkeley.

KUIJPER, C; CHRISTIANSEN, H; CORNELISE., WINTERWERP, J.C. Reducing Harbour Siltation. II: Case Study of Parkhafen in Hamburg. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*. n.131. p 267-276 (2005).

LAGES, R. S. Padrão de Ventos no extremo Sul Análise de 2000 a 2003 e aplicação a dispersão de poluentes. FURG Rio Grande, RS, 2003.

LIU, X., LANDRY, B.J., GARCÍA, M.H. 2008. Two-dimensional scour simulations based on coupled model of shallow water equations and sediment transport on unstructured meshes. *Coastal Engineering*. v.55. 800-810 p.

MALCHEREK, A., PIECHOTTA, F., KNOCH, D. 2005: Mathematical Module SediMorph – Technical Report, the Federal Waterways Engineering and Research Institute (BAW), Hamburg, Germany.

MALCHEREK, A., F., KNOCH, D. 2005. The Influence of Waves on the Sediment Composition in a Tidal Bay, 9th International Conference on Estuarine and Coastal Modeling Malcolm L. Spaulding - Editor, Charleston, South Carolina, USA.

MARQUES, W. C. 2005. Padrões de variabilidade temporal nas forçantes da circulação e seus efeitos na dinâmica da Lagoa dos Patos, Brasil. Dissertação de mestrado, Fundação Universidade Federal do Rio Grande.

MARQUES, W. C., FERNANDES, E.H.L., MONTEIRO, I.O., MÖLLER. 2009. Numerical Modelling of the Patos Lagoon Coastal Plume, Brazil. *Continental Shelf Research*. v. 29. p. 556-571.

MARQUES, W.C. 2009. Estudo da dinâmica da pluma costeira da Lagoa dos Patos. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande. 284 p.

MARTINS, L.R.S. 1963: Contribuição da sedimentologia da Lagoa dos Patos, I. Saco do Rincão e Medanha. Boletim da Escola de Geologia da UFRGS, 13, Porto Alegre.

MIRANDA, L.B.; BELMIRO, M.DE C. & KJERFVE, B. 2002.Princípios de Oceanografia Física de Estuários. São Paulo. Ed. USP. 424.p.

MÖLLER, O.O. 1996: Hydrodynamique de La Lagune dos Patos, Mésures et Modelisation. DSc. Thesis, Université Bordeaux I, France.

MÖLLER, O.O. LORENZETTI, J.A.,STECH, MATA, M.M.. 1996. The Patos Lagoon summertime circulation and dynamics. *Continental Shelf Research*, v. 16, n. 3, p. 335-351.

MÖLLER, O.O., CASTAING, P. 1999. Hydrographical characteristics of the estuarine area of Patos Lagoon (30°S, Brazil). In: Perillo, G.M.E.; Piccolo, M.C.;Quivira, M.P. (Eds.). *Estuaries of South America*. Springer-Verlag, p. 83-100.

MÖLLER JR, O.O., CASTAING, P., SALOMON J.C., LAZURE, P. 2001: The influence of local and non-local forcing effects on the subtidal circulation of Patos Lagoon. *Estuaries* v. 24. n.2:, 297-311.

MÖLLER, O.O.; CASTAING, P.; FERNANDES, E. H. L.; LAZURE, P. 2007. Tidal frequency dynamics of a southern Brazil coastal lagoon: choking and short period forced oscillations. *Estuaries and Coasts*, 30(2): 311-320.

MONTEIRO, I.O. 2007. Modelagem barotrópica da pluma da Lagoa dos Patos. Monografia de conclusão de curso, Fundação Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, RS, Brasil.

NICHOLS, M.M., ALLEN, G., 1981. Sedimentary processes in coastal lagoons. Coastal Lagoon Research, Past, Present and Future. UNESCO Technical Report in Marine Science 33:27-80.

NICHOLSON, J., BROKER, I., ROELVINK, J.A., PRICE, D., TANGUY, J.M., MORENO, L. 1997. Intercomparison of coastal area morphodynamic models. *Coastal Engineering*. v. 31. 97-123.

NIENCHESKI, L. F. H.; BAUMGARTEN, M. G.; FILLMANN, G.; WINDOM, H. L. 1999. Nutrients and suspended matter behavior in the Patos Lagoon Estuary (Brazil). In: G.M.E. Perillo, M.C. Piccolo, M. Pino-Quivira. (Org.). Estuaries of South America. Heidelberg: Springer-Verlag, p. 67-81.

NIKURADSE, J. 1933: Strömungsgesetze in rauhen Rohren. Forschungsheft 361, VDI. 2.7.1.

PARTHENIADES, E. 1965: Erosion and Deposition of Cohesive Soils. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, 91 (HY1): 105 – 138.

PEARSON, M.L. 2006: Modelagem Numérica do Transporte de Sedimento no Estuário da Lagoa dos Patos. Monografia de conclusão de curso, Fundação Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, RS, Brasil.

RIJN, L.V. 1985: Sediment transport part iii: Bed forms and alluvial roughness. *Journal of Hydraulic Engineering*. 110(12):1733 – 1755. 2.5

SANCHES-BADORREY, E., LOSADA, M.A., RODERO, J. 2008. Sediment transport patterns in front of reflective structures under wind wave-dominated conditions. *Coastal Engineering*. v. 55. 685-700.

SANTOS, M.M., VIERA, N., REIS-HENRIQUE, M.A., SANTOS, A.M. 2004. Imposax and butyltin contamination off the Oporto Coast (NW Portugal): a possible effect of the discharge of dredged material. *Environment International*, v. 30, n.6, p. 793-798.

SCHILLER, R.V., CECÍLIO, R.O. FERNANDES, E.H.L. 2003. Morphologically Induced Changes in the Circulation of the Patos Lagoon Estuary – Brazil. *Journal of Coastal Research*. Special Issue. 39.

SCHWEIM, C. 2002. Laborexperimente zur Erosion feiner Sedimentablagerungen in instationären Strömungen, Presentation on the 7th GESINUS Workshop in Vienna.

SHEPARD, F.P., MOORE, D.G. 1960: Bays of central Texas coast. In. Recent Sediments of Northwest Gulf of Mexico (Shepard, F.P., Phleger, F.B. and Van Andel, T.H., eds). American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, pp. 117 – 152.

SILVA, A., LEITÃO, J., DIAS, A., COLI, A., FACHIN, S., LONTRA, G. Evaluation of sediment transport processes in the Port of Fortaleza. *Coastal Engineering* 2000, Proceedings of the 27th International Conference on Coastal Engineering (ICCE-2000).

STANEVA, J., STANEV, E.V., WOLFF, J.O., BADEWIEN, T.H., REUTER, R., FLEMMING, B., BARTHOLOMÄ., BOLDING, K. 2009. Hydrodynamics and sediment dynamics in the German Bight. A focus on observations and numerical modeling in the East Frisian Wadden Sea. *Continental Shelf Research*, v.29. 302-319 p.

STRONKHORSTA, J.; ARIESEB, F.; VAN HATTUMB, B.; POSTMAC, J.F.; DE KLUIJVERC, M.; DEN BESTEND, P.J; BERGMANE, M.J.N.; DAANE, R.; MURKF, A.J.; VETHAAKA, A.D. (2203). Environmental impact and recovery at two dumping sites for dredged material in the North Sea. *Environmental Pollution*, v.124, p. 17-31.

SANTOS, I.R, MACHADO, M.I.,NIENCHESKI, L.F., BURNETT, W., MILANI, B.I., ANDRADE, C.F.F., PETERSON, R.N, CHANTON, J.,BAISCH, P. (2008) Major Ion Chemistry in a Freshwater Coastal Lagoon from Southern Brazil (Mangueira Lagoon): Influence of Groundwater Inputs. *Aquat Geochem*. v.14.p.133–146

SVAVARSSON, J; GRANMO, A; EKELUND, R; SPUZGAR, J. (2001) Occurrence and effects of Organotin on Adults Common Whelk (*Buccinum undatum*)(Mollusca, Gastropoda) in Harbours and Simulated Dredging. *Marine Pollution Journal*, v. 42, n.5, p.370-376.

TAGLIANI, P.R.A, ASMUS, M.L. (2001). RELATÓRIO TÉCNICO DE IMPACTO AMBIENTAL DAS ATIVIDADES DO PORTO DE RIO GRANDE. Fundação Universitária do Rio Grande.

TOLDO JR., E.E. 1994: Sedimentação, Predição do Padrão de Ondas e Dinâmica Sedimentar da Antepraia e Zona de Surfe dos Sistema Lagunar da Lagoa dos Patos. Tese de Doutorado, UFRGS.

TOMAZELLI, L. J. 1993. O regime de ventos e a taxa de migração das dunas eólicas costeiras do Rio Grande do Sul, Brasil. *Pesquisas* 20, 18-26.

TOMAZELLI, L. J., DILLENBURG, S. R. 2007. Sedimentary facies and stratigraphy of a last interglacial coastal barrier in south brasil. *Marine Geology* 244, 33-45.

STECH, J. L. & LORENZZETTI, J. A. 1992. The response of the south Brazil bight to the passage of wintertime cold fronts. *Journal of Geophysical Research* 97 (C6), 9507-9520.

VAZ, A. C., 2003: Efeito da descarga de água doce em processos ocorrentes no estuário da Lagoa dos Patos. Monografia do curso de Oceanologia da Fundação Universidade do Rio Grande, Rio Grande do Sul, Brasil.

VIEIRA, E. F., S. L. S. RANGEL. 1988. Planície Costeira do Rio Grande do Sul: geografia física, vegetação e dinâmica socio-demográfica. Sagra Editora, Brasil. 256 p.

VILLWOCK, J.A. 1977: Aspectos da sedimentação na região Nordeste da Lagoa dos Patos: Lagoa do Casamento e Saco do Cocuruto – RS- Brasil. Tese de Livre Docência. Instituto de Geociências, UFRGS, Porto Alegre Doutorado, UFRGS.

WALSTRA, L.C., RIJN, L.C.V., BLOGG, H., ORMONDT, M.V. 2001. Evaluation of a Hydrodynamic Area Model based on the COAST3D Data at Teignmouth 1999, Report TR121-EC MAST Project N° MAS3-CT97-0086. HR Wallinford, UK. D4.1-D4-4 p.

WINTERWERP, J.C. 2001. On the flocculation and settling velocity of estuarine mud. *Continental Shelf Research*. v. 22.1339-1360 p.

WINTERWERP, J.C. 2005. Reducing Harbour Siltation. I: Methodology. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*. n.131. p 258-266.