



23º Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore

Rio de Janeiro, 25 a 29 de Outubro de 2010

Gestão e Segurança da Navegação e do Transporte Aquaviário: Contribuições para um Desenvolvimento Ambientalmente Sustentável de Sistemas Marítimos e Fluviais

Elisa Helena Fernandes - Universidade Federal do Rio Grande - FURG, Instituto de Oceanografia,
Laboratório de Oceanografia Costeira e Estuarina

Wilian Correa Marques - Universidade Federal do Rio Grande - FURG, Instituto de Matemática,
Estatística e Física

Andreas Malcherek - Universität der Bundeswehr München, Hydromechanyc und Wasserbau,
Germany.

Resumo:

Ao longo dos seus 8.500 km de costa, o Brasil possui portos marítimos, estuarinos e lagunares, pelos quais se movimenta a quase totalidade do comércio exterior do País (navegação de longo curso), além da navegação de cabotagem entre portos nacionais. Aos mais de 40 principais portos comerciais marítimos brasileiros, agregam-se mais de 60 portos fluviais (terminais hidroviários), compondo um conjunto de mais de uma centena de pólos multimodais de transporte públicos e privados. Este cenário constitui uma das maiores redes fluviais do mundo, com cerca de 20.000 km em condições de navegação. Logo, o desenvolvimento dos sistemas hidroviários (marítimos e fluviais) é de importância estratégica para o País. Dentro deste contexto, é fundamental o desenvolvimento de ferramentas de modelagem numérica como uma importante contribuição para a gestão e a segurança da navegação e do transporte aquaviário, contribuindo para que este desenvolvimento ocorra de uma forma ambientalmente sustentável nos sistemas marítimos e fluviais brasileiros. No presente trabalho é utilizado para as simulações hidrodinâmicas o modelo numérico TELEMAC3D (@EDF – *Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement of the Company Elettrecité de France (EDF)*). O modelo de transporte de sedimentos de fundo que trabalha acoplado é o SediMorph, desenvolvido pelo *Federal Waterways Engineering and Research Institute* e pelo *Institute für Wasserwesen* da Universidade das Forças Armadas de Munique. Estes modelos foram aplicados a estudos de caso no Porto de Rio Grande, contribuindo especificamente para o estabelecimento das condições de navegação (correntes, marés, ventos, ondas) e principais processos físicos que controlam a hidrodinâmica e o transporte de sedimento da região, para o estabelecimento de procedimentos de segurança para a navegação e condições de operação e praticabilidade no porto, para o estabelecimento de condições limite para o trânsito seguro de embarcações, para a implementação de medidas permanentes com o objetivo de reduzir o assoreamento, e para a determinação das tendências evolutivas sazonais da dinâmica sedimentar, dependentes da interação morfológica e hidrodinâmica, fornecendo subsídios importantes para otimizar operações de dragagem.

1 – Introdução

Ao longo dos seus 8.500 km de linha costeira, o Brasil possui portos marítimos, estuarinos e lagunares, pelos quais se movimenta a quase totalidade do comércio

exterior do País (navegação de longo curso), além da navegação de cabotagem entre portos nacionais. Aos mais de 40 principais portos comerciais marítimos brasileiros, agregam-se mais de 60 portos fluviais (terminais hidroviários), compondo um conjunto de mais

de uma centena de pólos multimodais de transporte públicos e privados. Este cenário constitui uma das maiores redes fluviais do mundo, com cerca de 20.000 km em condições de navegação.

O grau de competitividade internacional do modal aquaviário brasileiro foi impulsionado pelo ordenamento jurídico da organização portuária proposto pela Lei Federal 8.630, que visava à modernização dos portos brasileiros com a participação da iniciativa privada. Neste período, foram feitos os maiores investimentos em projetos de construção, ampliação e modernização de portos e terminais nos principais portos brasileiros. Nos últimos anos, a combinação entre fatores como a demanda ambiental e comercial, e a necessidade de manutenção e expansão da atual infraestrutura 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 conseqüências sócio-econômico-ambientais em cascata para as cidades portuárias. Em função disso, o Governo Federal tem investido significativamente nos portos brasileiros como uma das metas do Plano de Aceleração do Crescimento (PAC) do Brasil.

O papel estratégico que o Estado do Rio Grande do Sul ocupa no sistema hidroviário nacional, por exemplo, se deve a rede de rios e lagos que saem de diversos municípios em direção à Lagoa dos Patos, conectada ao Oceano Atlântico no município de Rio Grande. Estes caminhos naturais formam 930 km de hidrovias no Estado, equipadas com um porto marítimo (Rio Grande), dois portos fluviais (Porto Alegre e Pelotas) e portos interiores (Cachoeira do Sul e Estrela). O Porto de Rio Grande é o mais importante, apresentando uma localização geográfica privilegiada na região de maior profundidade do Atlântico Sul, e com conexão com todo o Estado, o País e diversos países do Mercosul. Entretanto, a elevada quantidade de material em suspensão proveniente do sistema de rios localizado ao norte da Lagoa dos Patos promove o assoreamento dos canais de navegação destes portos, acentuando o efeito calado.

Recentemente, o Governo Estadual do RS iniciou uma ação que visa mudar a matriz de transporte do Estado a curto e médio prazo, investindo mais de R\$ 5.000.000,00 na dragagem de manutenção dos canais artificiais das hidrovias interiores em território

gaúcho. Além disso, é esperada para qualquer momento a entrada em operação de uma linha regular de barcas para carregamento de contêineres entre Porto Alegre e Rio Grande. Além da navegação interior através da Lagoa dos Patos, a região Sul do Brasil possui outra potencial hidrovia de destaque na Lagoa Mirim. Esta lagoa se conecta a Lagoa dos Patos através do Canal São Gonçalo, e oferece excelente alternativa de transporte aquaviário entre os países do Mercosul. Investimentos recentes já foram feitos no Porto de Santa Vitória do Palmar. A expansão da navegação por estas hidrovias gaúchas é um dos planos estratégicos do Ministério dos Transportes para o futuro próximo.

De uma forma geral, o desenvolvimento dos sistemas hidroviários (marítimos e fluviais) do Brasil é de importância estratégica pelo potencial das vias navegáveis na redução de custos e economia de combustível no transporte de cargas, bem como a conseqüente redução do tráfego rodoviário, com conseqüências diretas sobre o número de acidentes e o custo de manutenção nas rodovias estaduais. Logo, é fundamental o investimento no desenvolvimento de ferramentas que propiciem a adequada gestão destes sistemas aquaviários, e garantam a segurança da navegação e do transporte no seu interior. As ferramentas de modelagem numérica propostas neste trabalho, figuram como uma importante contribuição para a gestão e a segurança da navegação e do transporte aquaviário, contribuindo para que este desenvolvimento ocorra de uma forma ambientalmente sustentável nos sistemas marítimos e fluviais estudados. Além disso, os produtos esperados da presente proposta são ferramentas de gestão inéditas que podem ser aplicadas em qualquer sistema hidroviário marítimo ou fluvial no Brasil.

2 – Metodologia

A grande variabilidade temporal e espacial dos processos que ocorrem no estuário da Lagoa dos Patos e região costeira adjacente sugere que um estudo mais detalhado da hidrodinâmica e dinâmica sedimentar desta região não pode ser realizado somente com base em dados de campo. Uma alternativa a esta limitada disponibilidade de dados de campo é a utilização de modelos numéricos como sofisticadas técnicas de previsão do comportamento do ambiente perante cenários específicos. Neste trabalho, o comportamento do estuário perante as principais forçantes físicas do sistema (vento, descarga, marés, ondas geradas pelo vento e efeitos dinâmicos

de longo período) e a nova configuração proposta para o Porto de Rio Grande foi estudado através de experimentos de modelagem numérica. Para a realização das simulações hidrodinâmicas, foi utilizado o modelo numérico TELEMAC3D, e para as simulações morfodinâmicas foi utilizado o sistema de modelagem TELEMAC3D + SediMorph. Estes modelos foram aplicados a estudos de caso no Porto de Rio Grande, contribuindo especificamente para o estabelecimento das condições de navegação (correntes, marés, ventos, ondas) e principais processos físicos que controlam a hidrodinâmica e o transporte de sedimento da região, para o estabelecimento de procedimentos de segurança para a navegação e condições de operação e praticabilidade no porto, para o estabelecimento de condições limite para o trânsito seguro de embarcações, para a implementação de medidas permanentes com o objetivo de reduzir o assoreamento, e para a determinação das tendências evolutivas sazonais da dinâmica sedimentar, dependentes da interação morfológica e hidrodinâmica.

2.1 – Modelagem Hidrodinâmica

O modelo TELEMAC3D resolve as equações de Navier-Stokes considerando as variações locais na superfície livre do fluido, desprezando as variações de densidade na equação de conservação da massa, considerando a pressão hidrostática e a aproximação de Boussinesq para resolver as equações do momento (Hervouet, 2007). As equações simplificadas são apresentadas abaixo:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \bar{u}\bar{\nabla}(u) = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}^2(v_H \bar{\nabla}u) + F_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \bar{u}\bar{\nabla}(v) = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}^2(v_H \bar{\nabla}v) + F_y \quad (3)$$

$$p = \rho_0 g(S - z) + \rho_0 g \int_z^S \frac{\Delta\rho}{\rho_0} dz \quad (4)$$

Onde: x, y representam as coordenadas espaciais (m), z representa a coordenada espacial vertical (m); F_x, F_y são os termos fonte/sumidouro (m s⁻²), que representam o vento, força de Coriolis, fricção de fundo, uma

fonte ou sumidouro de momento dentro do domínio, ρ₀ é a densidade de referência (kg m⁻³), p representa a pressão (N m⁻²), g é a aceleração da gravidade (m s⁻²), t representa o tempo (s), u, v e w as componentes de velocidade (m s⁻¹), S é a elevação de superfície livre (m), e ν_H representa o coeficiente de viscosidade turbulenta (m² s⁻¹).

O modelo TELEMAC calcula a salinidade baseado na lei de conservação de massa:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \bar{u}\bar{\nabla}(T) = \text{div}^2(\nu_T \bar{\nabla}T) + Q \quad (5)$$

Onde: T representa a concentração de traçador dissolvido (g l⁻¹ or °C), Q é o termo fonte ou sumidouro de traçador (g l s⁻¹), e ν_T o coeficiente de difusão do traçador (m² s⁻¹).

A solução das equações está baseada no método dos elementos finitos, que permite o controle da distribuição de elementos na grade utilizada, permitindo estabelecer alta resolução em áreas de morfologia costeira e topografia de fundo complexa, como a região estuarina e plataforma interna, e baixa resolução nas regiões de menor interesse. A discretização vertical do modelo é feita em níveis sigma, favorecendo a representação de variações batimétricas.

A fricção de fundo foi parametrizada através da Lei de Manning, que tem sido aplicada com sucesso em simulações para o estuário da Lagoa dos Patos (Fernandes et al. 2001; 2005), prescrevendo um coeficiente de fricção de 0.04 m^{1/6} constante em todo o domínio. O modelo de turbulência horizontal utilizado neste trabalho foi o Smagorinsky, geralmente utilizado em domínios marítimos com fenômenos turbulentos de larga escala, que calcula o coeficiente de mistura considerando o tamanho da malha de elementos e o campo de velocidade (Smagorinsky, 1963). O modelo de turbulência vertical utilizado foi o de comprimento de mistura, de forma a melhor representar a estratificação e os processos de mistura.

2.2 – Modelagem Morfodinâmica

O modelo morfológico e de transporte de sedimento em suspensão SediMorph funciona acoplado ao modelo hidrodinâmico TELEMAC3D, calculando o transporte de sedimento, fluxo de erosão, atrito com o fundo e a evolução da batimetria. O funcionamento deste acoplamento é apresentado na Figura 1. O SediMorph utiliza um arquivo de

classificação de sedimento, onde as diferentes classes são definidas, sendo caracterizados o diâmetro e a densidade de cada uma. Através deste arquivo, é gerada uma grade tridimensional de fundo, que consiste de uma malha bidimensional não estruturada com diversos níveis na vertical, formando assim uma malha de volumes finitos. A fração do volume de cada classe de sedimento especificada no arquivo de classificação deve ser definida para cada elemento da grade. A camada de interface 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 indisponibilidade de dados de distribuição vertical dos sedimentos na região. A camada rígida é o limite vertical da malha, onde não podem mais ocorrer processos erosivos.

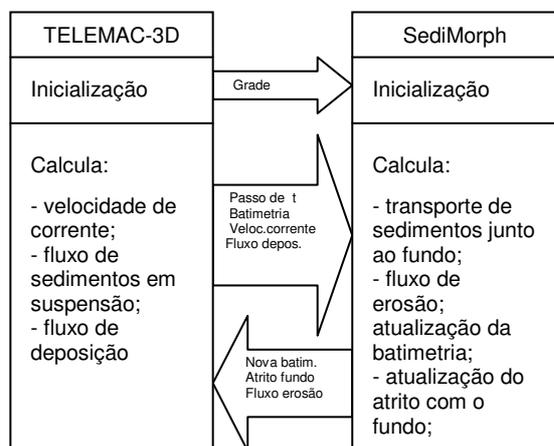


Figura 1: Acoplamento entre os modelos TELEMAC3D e SediMorph.

2.3 – Domínio, condições iniciais e de contorno

O domínio do modelo é representado por uma grade batimétrica de 11459 nós que se estende entre as latitudes de 28° S (Florianópolis-SC) e 36° S (Punta Del Este – Uruguai), e as longitudes de 45° W e 54° W, atingindo profundidades superiores a 3700 m (Figura 2).

Condições iniciais de salinidade, temperatura, nível do mar e campos de velocidade foram prescritas no modelo TELEMAC3D. Campos de salinidade e temperatura foram obtidos do projeto OCCAM (Ocean Circulation and Climate Advanced Modeling Project - <http://www.soc.soton.ac.uk/>), e prescritos de forma tri-dimensional em todo o domínio. Um

nível de água de 0.4 m, valor aproximado da média de maré na região, e um campo de velocidades iniciais nulas foram prescritos em todo o domínio.

Além de condições iniciais pré-definidas, o modelo numérico necessita de condições de contorno para possibilitar o cálculo das variáveis. Os contornos líquidos utilizados neste trabalho são as fronteiras continentais do Rio Guaíba, do Rio Camaquã e do Canal São Gonçalo, onde são prescritas séries temporais de descarga fluvial, e a fronteira oceânica, onde é prescrita a maré. No contorno superficial deste estudo foram prescritos dados de vento dinâmico e fluxos de calor.

As séries temporais de descarga prescritas nas fronteiras continentais do rio Guaíba e do rio Camaquã foram extraídas da página da Agência Nacional de Águas (www.ana.gov.br, ANA) para o período simulado. Os dados de descarga do Canal São Gonçalo foram considerados constantes em 760 m³s⁻¹. Devido às dimensões do domínio considerado, as variações espaciais do vento devem ser levadas em consideração. Dados de vento para a região foram extraídos da página do National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA), disponíveis no site www.cdc.noaa.gov/cdc/reanalysis, com resolução espacial de 2,5° e temporal de 6 horas.

Na fronteira oceânica do domínio foram prescritos dados de amplitude e fase das quatro principais componentes de maré da região, calculadas pelo Grenoble Model FES95.2 (Finite Element Solution – v.95.6). O contorno oceânico externo foi forçado ainda com variações de nível em baixa frequência (médias de 30 dias). Os contornos oceânicos transversais a região costeira foram forçados com variações de velocidade de corrente em baixa frequência (média de 30 dias) e todos os contornos oceânicos foram forçados com variações de salinidade e temperatura em baixa frequência (média de 30 dias). Estes dados foram obtidos do projeto OCCAM (<http://www.noc.soton.ac.uk/JRD/OCCAM/>). O sumário das condições de contorno é apresentado na Figura 2.

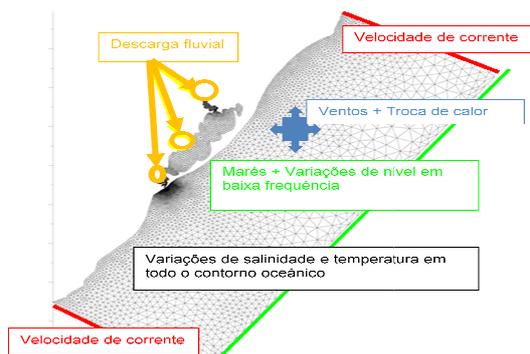


Figura 2: Contornos líquidos e superficiais considerados neste estudo.

Para prescrever a distribuição horizontal dos sedimentos da Lagoa dos Patos, foram utilizados dados coletados durante o Projeto Lagoa, da FURG, entre os anos de 1975 e 1979. Para otimizar o tempo de simulação, o sedimento foi dividido em 3 classes: areia grossa, areia fina e silte. As duas primeiras classes são tratadas pelo modelo como carga de fundo, enquanto que a última é transportada em suspensão.

A influência de ondas de curto período geradas pelo vento foi considerada como uma condição de contorno superficial do modelo. Informações da altura significativa e período de pico destas ondas foram obtidos através da utilização do módulo de ondas do sistema de modelagem TELEMAC (TOMAWAC - TELEMAC-based Operational Model Addressing Wave Action Computation). O módulo simula a evolução no espaço e tempo do espectro de energia das ondas geradas pelo vento para aplicação no domínio oceânico e sua influência é implementada diretamente na tensão de cisalhamento de fundo do modelo morfodinâmico.

As simulações numéricas foram realizadas considerando a nova configuração estabelecida pela Secretaria Especial de Portos (SEP) para o Porto de Rio Grande. Esta nova configuração considera o aprofundamento para 60 pés entre a bóia 1 e a bóia 7; aprofundamento para 53 pés no o canal de acesso (da bóia 7 até a seção 355) e aprofundamento para 40 pés no Porto Novo e no Terminal de São José do Norte (TSJ). Além disso, foi considerada a extensão e convergência dos Molhes da Barra (Figura 3).

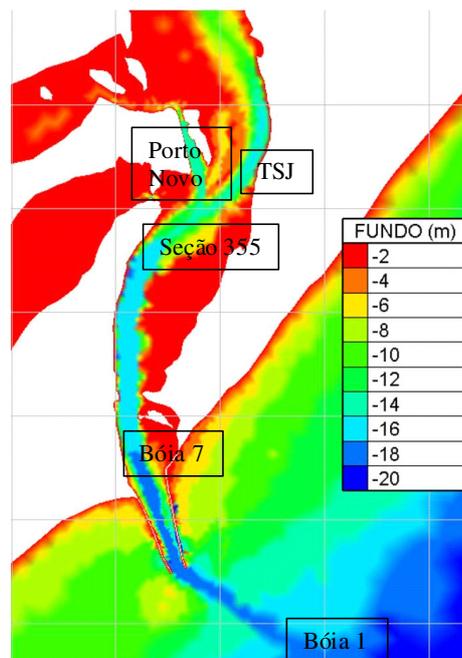


Figura 3 – A nova configuração do canal de acesso ao Porto de Rio Grande.

2 – Metodologia

3 – Resultados

3.1 – Determinação de padrões de circulação na região

Nesta seção são apresentados resultados que ilustram a contribuição dos modelos numéricos para o estudo do comportamento residual da velocidade de corrente na região. Os resultados do modelo para a camada superficial do modelo indicam uma condição de vazante predominante com velocidades entre 0.4 e 0.8 m s⁻¹ (Figura 4A). Este comportamento se deve a uma combinação de fatores associados à descarga fluvial dos principais rios afluentes da Lagoa dos Patos, e condições de ventos predominantes na região. Durante o período estudado (verão e outono) a descarga fluvial se apresentou muito acima da média por conta da influência de um evento de El Niño Oscilação Sul (ano de 1998). Neste período, os ventos de quadrante norte dominaram e contribuíram para a vazante do sistema. Marques et al. (2009) verificaram, através de experimentos de modelagem numérica tridimensional, o mesmo padrão residual de exportação de águas da Lagoa dos Patos, analisando o campo de salinidade superficial para o ano de 1998.

O comportamento residual na camada de fundo se mostra sensivelmente diferente, com uma tendência de vazante fraca (velocidade < 0.30 m s⁻¹) na parte superior do canal, e com

uma tendência de enchente junto à desembocadura (Figura 4B), onde é possível observar a presença de uma zona de convergência, que pode ter importante contribuição para o aprisionamento dos sedimentos e/ou poluentes que são transportados pela camada de fundo.

O padrão residual de circulação ao longo do canal indica que a influência da ação da descarga continental e dos ventos se estende por toda a coluna de água, no entanto, a ação remota dos ventos junto à zona costeira indica uma tendência à introdução de águas pelas camadas inferiores da coluna de água. É importante ressaltar que o padrão residual para as velocidades médias ao longo da coluna de água indica que o regime de vazante observado na camada superficial do modelo é mesmo o dominante durante o período. Fernandes et al. (2009) verificaram a mesma tendência de vazante residual analisando a circulação do canal de acesso a Lagoa dos Patos. As maiores velocidades de corrente são observadas nas regiões mais estreitas do canal de acesso, onde o fluxo sofre algum tipo de estrangulamento (Figura 4A e 4B), como a região da Praticagem da Barra e a desembocadura do canal, por exemplo.

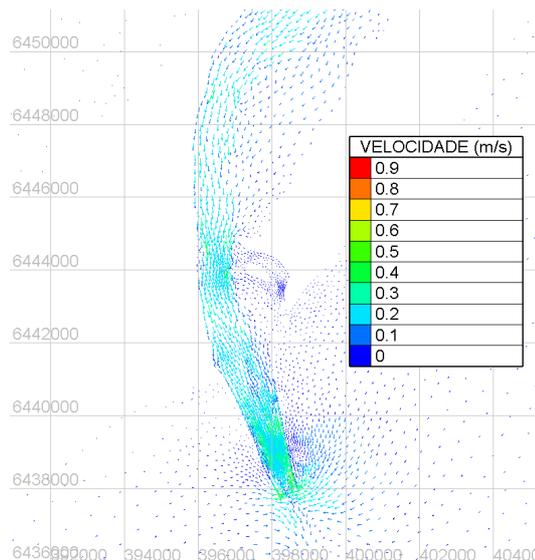
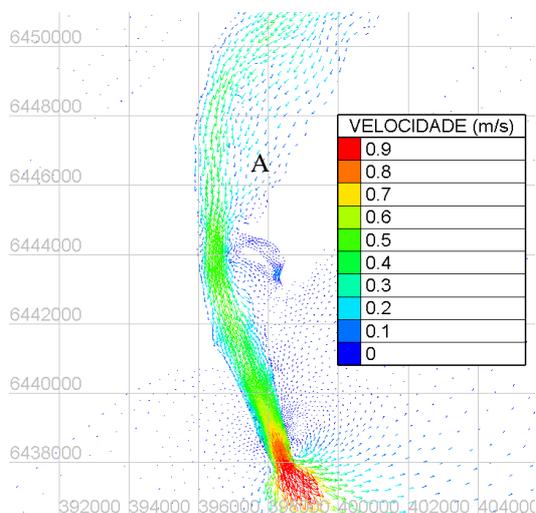


Figura 4: Campo residual de velocidade de corrente na camada superficial (A) e de fundo (B) do modelo após 94 dias de simulação.

3.2 - Determinação de tendências de erosão/deposição

Nesta seção são apresentados resultados que ilustram a capacidade dos modelos numéricos de determinar as tendências de ocorrência de processos de erosão e deposição na região do Porto de Rio Grande.

A Figura 5 apresenta o fluxo de erosão médio entre janeiro e abril de 1998. De forma geral, a região do canal de acesso se apresenta como uma região de alto fluxo de erosão de sedimentos devido à intensidade das correntes observadas. Entretanto, algumas regiões apresentam-se como núcleos de maior erosão, principalmente junto à desembocadura do canal de acesso e ao norte do canal, próximo ao Saco da Mangueira, onde valores médios podem ultrapassar $2 \times 10^{-6} \text{ kg s}^{-1}$. De maneira geral, o canal de acesso apresenta um fluxo médio de erosão da ordem de $1 \times 10^{-6} \text{ kg s}^{-1}$.

A região ao sul da estação da Praticagem da Barra apresenta um padrão de erosão mais crítico, onde são observados os maiores fluxos médios. Esta região apresenta esta característica devido a sua morfologia, já que o afunilamento do canal em direção ao oceano contribui para a intensificação das velocidades de corrente e por consequência, das tensões de cisalhamento sobre o fundo. Além deste fator, a proximidade desta região com o oceano faz com esta seja mais afetada pelos fluxos de enchente gerados pelos desníveis entre a zona costeira e a região lagunar. Por outro lado, a região ao norte da

estação da Praticagem da Barra, por ser mais abrigada, apresenta um padrão erosivo menos intenso. Entretanto, este comportamento também é importante devido a altas velocidades de corrente observadas ao longo do canal de navegação. Fernandes et al. (2008) verificaram um padrão de erosão similar analisando os processos morfodinâmicos desta região através de simulações numéricas bi-dimensionais.

Como consequência do intenso efeito erosivo observado na região do canal de acesso a Lagoa dos Patos, o mapa de evolução do fundo durante os 94 dias de simulação (Figura 6) indica que a região ao sul da Praticagem apresentou um quadro de evolução negativa do fundo, indicando erosão da ordem de 0.5 cm. Na região ao norte da estação dos Práticos da Barra houve uma alternância entre a ação de erosão e deposição de sedimentos, de forma que não foi apresentado um padrão erosivo bem definido. Existem pontos onde os processos erosivos são mais importantes, indicando decréscimos entre 0.1 e 0.3 cm, e outros pontos onde a evolução positiva (deposição de sedimentos) pode alcançar 1 cm no período simulado.

De forma a avaliar a evolução temporal da erosão em frente à área do TECON Rio Grande, séries temporais do fluxo de erosão foram extraídas em três pontos transversais ao canal de acesso (Figura 6), e comparadas com o comportamento dos ventos e correntes nesta região durante o período estudado (Figura 7). Valores negativos indicam ventos provenientes de quadrante norte e correntes de vazante.

Os resultados mostram que a direção das correntes segue o padrão de variabilidade dos ventos em escala de alguns dias. Entretanto, devido à grande intensidade da descarga fluvial durante o período estudado, ventos fortes nem sempre conseguem reverter o padrão de vazante do sistema. Neste sentido, as enchentes se apresentam com baixa intensidade de velocidade de corrente. As vazantes são mais intensas, sobretudo, quando ocorre a combinação da circulação gravitacional dirigida pela grande descarga fluvial e ação de ventos de quadrante norte.

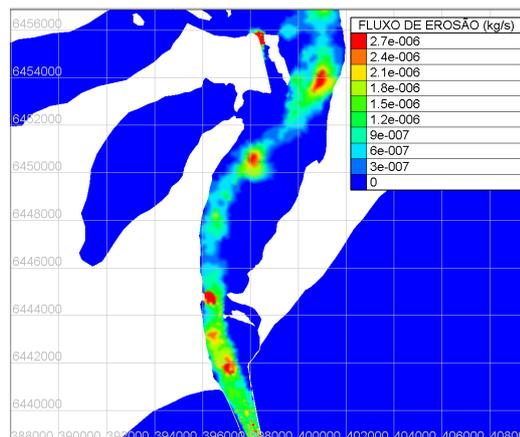


Figura 5: Fluxo de erosão médio após 94 dias de simulação.

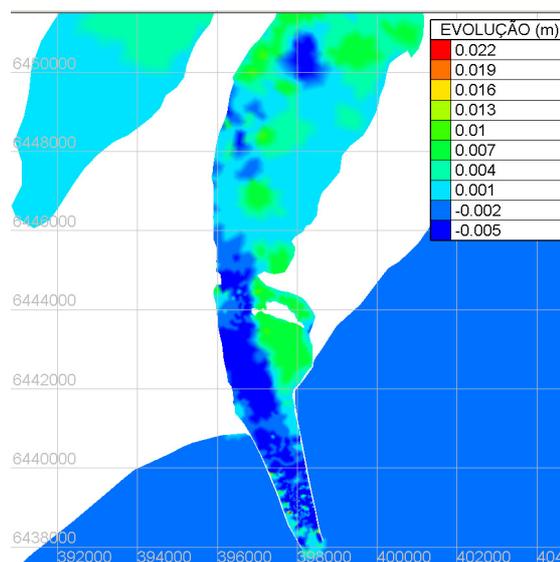


Figura 6: Evolução do fundo após 94 dias de simulação. Valores negativos indicam erosão.

A análise combinada das séries temporais de ventos e correntes (Figura 7) e das séries de fluxo de erosão nas três diferentes posições do canal de acesso junto à região do TECON Rio Grande (Figura 8) indica as maiores ocorrências de erosão associadas a períodos em que ocorrem as maiores vazantes. Os resultados também mostram um padrão de erosão que diminui de uma margem a outra, sendo mais intenso na margem oeste do canal, devido às maiores intensidades de corrente de vazante observadas nesta região. A ocorrência de maiores intensidades de corrente junto à margem oeste do canal de acesso já foi observada anteriormente por Fernandes (2001) e Fernandes et al. (2005).

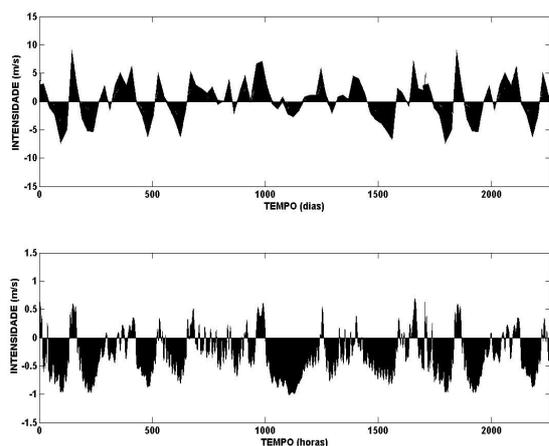


Figura 7: Intensidade e direção dos ventos (A) e das correntes (B) junto à região do TECON Rio Grande durante 94 dias de simulação. Valores negativos indicam ventos provenientes de quadrante norte e correntes de vazante.

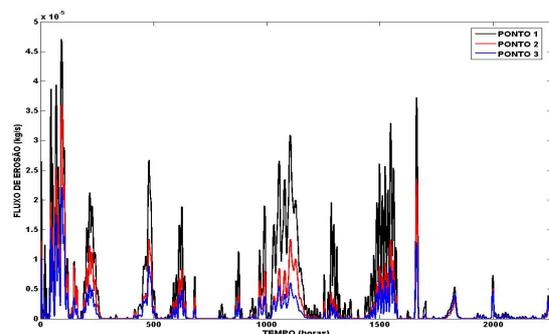


Figura 8: Séries temporais de fluxo de erosão em três pontos transversais ao canal de acesso.

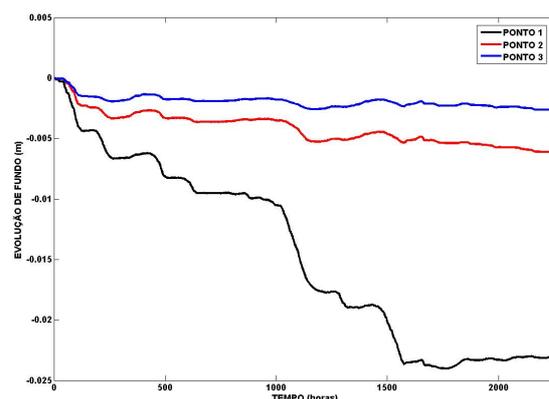


Figura 9: Séries temporais de evolução do fundo em três pontos transversais ao canal de acesso.

As séries de evolução de fundo (Figura 9) para os pontos selecionados transversalmente ao canal de acesso indicam o padrão de erosão decrescente em direção a margem

leste do canal. Na região mais crítica, junto ao canal de navegação (Ponto 1), onde as velocidades de corrente são mais intensas, uma erosão de até 2.5 cm pode ser observada em um período de 94 dias. Nas regiões mais rasas (Pontos 2 e 3), o nível de erosão é menor e mais estável, sendo menor que 0.5 cm na mesma escala de tempo. Então, os resultados indicam que, considerando um padrão sinótico cíclico, e não sujeito a influências de processos inter-anuais, podemos verificar uma taxa de erosão entre 0.1 e 9 cm ao ano na área do TECON Rio Grande.

3.3 - Determinação do padrão de salinização

Nesta seção são apresentados resultados que ilustram a utilização dos modelos numéricos para a investigação da salinização da região do Porto de Rio Grande. Nesta região condições de ventos de quadrante sul proporcionam um regime de enchente no sistema e a conseqüente salinização do estuário. Por outro lado, ventos de quadrante norte tendem a promover a vazante do sistema. O estudo foi realizado em um período de alta descarga fluvial, no ano de 1998, e o maior evento de enchente observado foi selecionado para a análise.

A Figura 10A apresenta as condições de vento no começo do período de enchente. Estas condições para o hemisfério sul favorecem o aumento do nível do mar junto à zona costeira pelo efeito de Ekman, e por conseqüência o bombeamento de águas de origem oceânica para dentro do estuário (Figura 11A).

Um dia depois, os ventos diminuem de intensidade (Figura 10B), mudam de direção para sudeste e as águas oceânicas atingem o seu máximo alcance dentro do estuário (Figura 11B). No dia 85 de simulação (Figura 10C), os ventos mudam para nordeste com baixa intensidade, porém ocorre a reversão do fluxo e se inicia o processo de vazante na região estuarina (Figura 11C). Durante o período simulado os processos de salinização são dificultados pela alta intensidade da descarga fluvial do período, a qual induz a uma intensa circulação gravitacional. Em trabalhos anteriores de Möller (1996) e Fernandes (2001) já foram verificadas intrusões de sal nas regiões superiores do estuário, principalmente em períodos de média e baixa descarga fluvial.

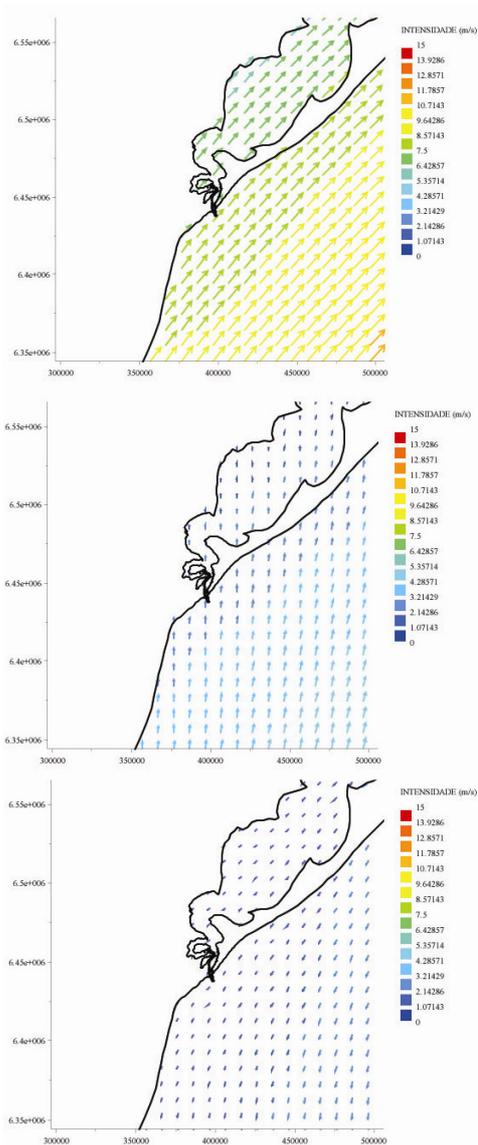


Figura 10: Direção e intensidade dos ventos para os dias 83 (A), 84 (B) e 85 (D) de simulação.

A estrutura vertical salina do estuário foi investigada através da análise de séries temporais de salinidade na camada superficial e de fundo do modelo para um período de 24 dias em quatro diferentes pontos (Figura 12). A Figura 12A mostra os perfis de salinidade mais próximos da desembocadura (P1) indicando maior interação entre a circulação gravitacional e oceânica, o que pode ser identificado pela estrutura bem estratificada apresentada observada durante quase todo o período. Os outros pontos mostram a menor contribuição da circulação oceânica, onde os pulsos de intrusão salina se reduzem gradativamente em intensidade e ocorrência, de forma que apenas um evento bem definido de salinização pode ser observado nos outros três pontos (P2, P3 e P4) entre os dias 83 e

87. Um ponto importante a ser ressaltado é o decaimento na intensidade da salinidade com o aumento da distância à boca do estuário.

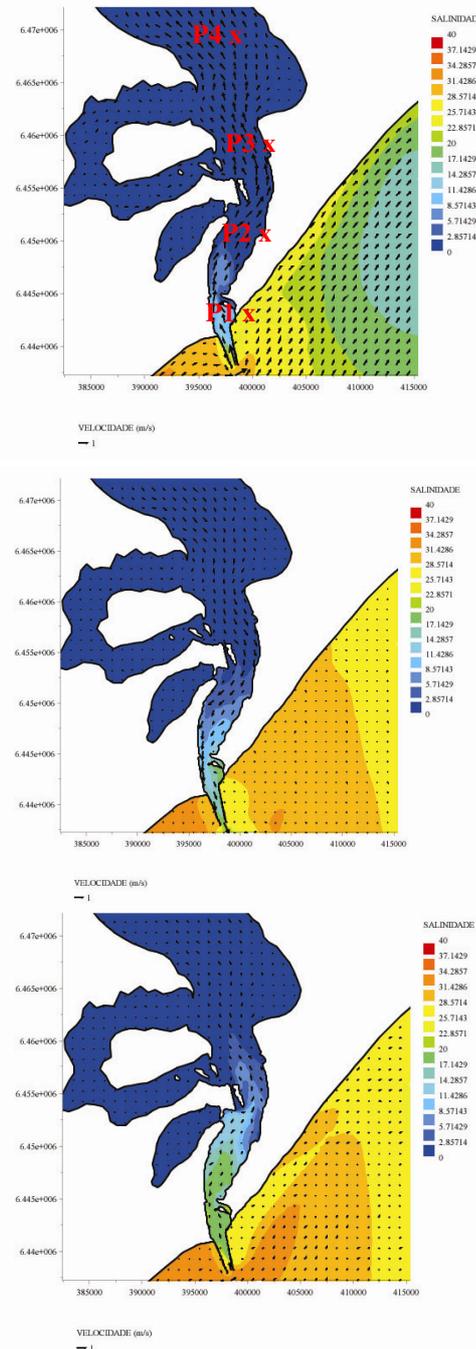


Figura 11: Mapas de salinidade e corrente na superfície para os dias 83 (A), 84 (B) e 85(C) de simulação.

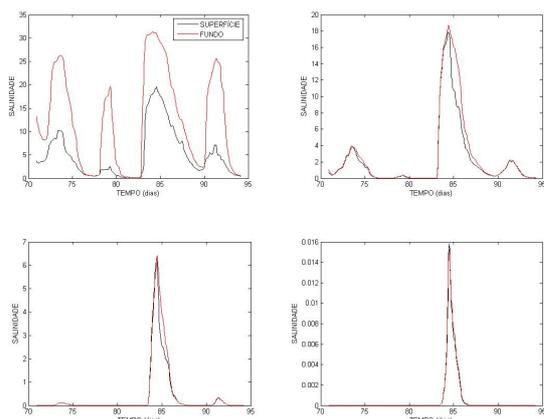


Figura 12: Séries temporais de salinidade na superfície e no fundo em quatro diferentes pontos na região estuarina da Lagoa dos Patos do dia 70 ao dia 94 de simulação. Os pontos são apresentados na Figura 11 (P1, P2, P3 e P4).

Podemos verificar que para dos eventos de intrusão de sal analisados entre os dias 70 e 94, mais de 75% da concentração de sal introduzida pelo canal de acesso ficou restrita a parte inferior do estuário, não alcançando o ponto 2 que está distante aproximadamente 8 km do ponto 1. Junto ao ponto 3, localizado pouco acima da região do Porto Novo de Rio Grande, cerca de 97% da salinidade introduzida durante estes eventos já havia sido redistribuída pelas áreas rasas do estuário. Este resultado sugere a grande importância da intensidade da descarga fluvial dos principais rios afluentes da Lagoa dos Patos como fator de bloqueio a intrusão do sal na região estuarina da laguna. A capacidade de prever o comportamento da salinização do estuário, bem como a alteração do seu padrão mediante alterações na configuração do Porto de Rio Grande, é de grande importância para a região, pois tem relação direta com a deposição de sedimentos no interior da área portuária.

4 – Considerações finais

Os resultados apresentados neste trabalho ilustram uma variedade de aplicações de modelos numéricos hidrodinâmicos e de transporte de sedimento na área do Porto de Rio Grande. Entretanto, apesar das inegáveis vantagens da aplicação de técnicas de modelagem numérica como uma ferramenta que pode contribuir significativamente para o gerenciamento e o desenvolvimento ambientalmente sustentável dos portos brasileiros, sua aplicação nos ambientes

portuários brasileiros não figura como uma das exigências da CONAMA 344. Esta resolução se concentra no estabelecimento das diretrizes gerais e procedimentos mínimos para a avaliação do material a ser dragado visando ao gerenciamento de sua disposição em águas jurisdicionais brasileiras, abrangendo somente aspectos relacionados à caracterização física, química e ecotoxicológica do material a ser dragado. Logo, é fundamental que uma revisão desta resolução passe a levar em consideração a necessidade de aplicação de técnicas de modelagem numérica como uma ferramenta preditiva nos processos de licenciamento ambiental.

Além disso, a disponibilização de séries temporais longas das principais forçantes físicas (elevação do nível do mar, corrente, salinidade, descarga fluvial, por exemplo) utilizadas para forçar e validar os modelos numéricos é um dos principais problemas enfrentados pelo modelador. Atualmente, as escassas séries temporais disponíveis não são longas o suficiente, e foram adquiridas através de projetos de pesquisa financiados por órgãos de fomento, onde não é dada prioridade à continuidade de aquisição dos dados nas zonas costeiras. Por outro lado, não existe por parte da regulamentação dos portos brasileiros uma obrigatoriedade na manutenção de equipamentos oceanográficos em suas instalações, o que contribuiria sobremaneira para a sua operação e alimentaria o banco de dados necessários para a modelagem numérica.

Para suprir estas limitações, neste trabalho foi utilizada a alternativa de expandir a grade do modelo numérico para uma escala regional, o que possibilita a obtenção de dados oceanográficos de modelos numéricos regionais disponíveis na internet. Entretanto, esta alternativa apresenta um elevado custo computacional, pois eleva de forma significativa o tempo das simulações realizadas. Além disso, as limitações de dados continuam sendo um problema grave para os experimentos de validação dos modelos numéricos, e representa uma limitação severa para a realização de estudos de longo período em regiões portuárias, como o impacto das mudanças climáticas nas atividades portuárias do País, por exemplo.

Dentro do contexto atual de desenvolvimento das instalações portuárias no País, os modelos foram aplicados a estudos de caso no Porto de Rio Grande, contribuindo especificamente para o estabelecimento das condições de navegação (correntes, marés, ventos, ondas) e principais processos físicos

que controlam a hidrodinâmica e o transporte de sedimento da região. Estes resultados são fundamentais para o estabelecimento de procedimentos de segurança para a navegação e condições de operação e praticabilidade no porto, para o estabelecimento de condições limite para o trânsito seguro de embarcações, para a implementação de medidas permanentes com o objetivo de reduzir o assoreamento, e para a determinação das tendências evolutivas sazonais da dinâmica sedimentar, dependentes da interação morfológica e hidrodinâmica, fornecendo subsídios importantes para otimizar operações de dragagem.

Logo, as ferramentas de modelagem numérica propostas neste trabalho, figuram como uma importante contribuição para a gestão e a segurança da navegação e do transporte aquaviário, contribuindo para que este desenvolvimento ocorra de uma forma ambientalmente sustentável nos sistemas marítimos e fluviais estudados.

5 – Referências Bibliográficas

Fernandes, E. H. L., (2001). Modelling the hydrodynamics of the Patos Lagoon, Brazil. DSc. Thesis, Institute of Marine Studies Faculty of Science, University of Plymouth, England.

Fernandes, E. H. L., Dyer, K. R. & 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. (2005). Spatial gradients in the flow of the southern Patos Lagoon. *Journal of Coastal Research* 21(4), 759-769.

Fernandes, E. H. L., Marques, W. C., Monteiro, I. O., Gonçalves, R. C. (2008). Estudo hidro e morfodinâmico do canal de acesso ao Porto do Rio Grande, Porto Novo e Terminal de São José do Norte. Programa de monitoramento ambiental do Porto de Rio Grande. Julho de 2008.

Fernandes, E. H., Melo Filho, E., Rocha, G. A., Strauch, J. C., Calliari, L. J., Möller, O. O., Cuchiara, D. C., Freitas, A. C. N., Abe, M. P., Marques, W. C., Jesus, A. C., Lazaneo, C. Z., Kirinus, E. P., Flores, E. G., Hammes, G. R., Guimarães, P. V., Ávila, R. A., Alves, R. M. (2009). Potencial Energético das ondas –

relatório I, modulo 2. Projeto EONDAS. Fevereiro de 2009.

Hervouet, J-M. (2007). Hydrodynamics of free surface flows: modeling with the finite element method. John Wiley & Sons, Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester.

Marques, W. C., Fernandes, E. H., Monteiro, I. O. Möller, O. O. (2009). Numerical modeling of the Patos Lagoon coastal plume, Brazil. *Continental Shelf Research*. 29:556-571.

Möller, O.O. (1996). Hydrodynamique de la Lagune dos Patos. Mesures et modélisation. Tese de doutorado. Universidade de Bordeaux I, 204 p.

Smagorinski, J., (1963). General circulation experiments with the primitive equation, I. The basic experiment. *Weather Review*. 91, 99-164.