



## **Capítulo VIII**

### **ANÁLISE HIDROMORFODINÂMICA DO CANAL DO ESTUÁRIO DA LAGOA DOS PATOS: ESTUDO DE CASO PARA 2011**







# ANÁLISE HIDROMORFODINÂMICA DO CANAL DO ESTUÁRIO DA LAGOA DOS PATOS: ESTUDO DE CASO PARA 2011

Thauana Rodrigues Gonçalves<sup>1</sup>; Thaísa Beloti Trombetta<sup>2</sup>; Osmar Olinto Möller Júnior<sup>3</sup>; Wiliam Correa Marques<sup>4</sup>

<sup>1,2,4</sup>Laboratório de Análise Numérica e Sistemas Dinâmicos (LANSD) - Instituto de Matemática, Estatística e Física (IMEF) - Universidade Federal do Rio Grande (FURG) – Avenida Itália, Km 8, 96201-900, Rio Grande - RS, Brasil.

thauanagon@gmail.com (autora correspondente); thaisatrombetta@furg.com; wilianmarques@furg.br

<sup>3</sup> Laboratório de Oceanografia Costeira e Estuarina (LOCOSTE) - Instituto de Oceanografia (IO) - Universidade Federal do Rio Grande (FURG) – Avenida Itália, Km 8, 96201-900, Rio Grande - RS, Brasil. dfsomj@furg.br

## RESUMO

O estuário da Lagoa dos Patos, localizada no extremo sul do Brasil, apresenta forte relação entre a hidrodinâmica e a morfodinâmica, podendo resultar em variações no fluxo dos sedimentos e, conseqüentemente, na sua deposição e/ou erosão. A circulação deste ambiente é predominantemente influenciada pela ação dos ventos e das descargas fluviais, recebendo um grande aporte sedimentar dos seus afluentes. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo analisar o comportamento hidrodinâmico e os aspectos morfodinâmicos do estuário da Lagoa dos Patos, ao longo do ano de 2011. A metodologia foi realizada através da modelagem numérica, com o modelo hidrodinâmico TELEMAC-3D e o modelo de transporte de sedimentos Psed. Os resultados demonstraram que há predominância de ventos de nordeste ao longo do ano, causando um empilhamento de água no alto estuário, com a elevação da superfície livre superando 1,2 m. Na desembocadura da laguna, os valores resultaram mais baixos, atingindo 0,7 m. Em relação às velocidades das correntes, foi verificado uma aceleração no canal de acesso, atingindo valores superiores a 0,2 m/s, com picos entre os meses de agosto e outubro. Para o mesmo período, foram encontradas as maiores tensões de cisalhamento de fundo e taxas de erosão sedimentar, correspondendo a 3,5 N/m<sup>2</sup> e 0,8 m/s, respectivamente. Além disso, as análises espaciais demonstraram que a margem oeste do canal foi a mais afetada por eventos de erosão. Sendo assim, os resultados deste estudo poderão contribuir com o estado da arte da região, e auxiliar em projetos que envolvem a temática.

Palavras-chave: modelagem numérica; hidrodinâmica; Lagoa dos Patos; estuário.

## HYDROMORPHODYNAMIC ANALYSIS OF PATOS LAGOON ESTUARY CHANNEL: CASE STUDY FOR 2011

### ABSTRACT

The Patos Lagoon estuary, located in southern Brazil, has a

strong relationship between hydrodynamics and morphodynamics, which can result in variations in the flow of sediments and, consequently, in their deposition and/or erosion. The circulation of this environment is predominantly influenced by the action of winds and fluvial discharges, receiving a large sedimentary contribution from its tributaries. In this context, the present work aims to analyze the hydrodynamic behavior and morphodynamic aspects of the Patos Lagoon estuary, throughout 2011. The methodology was carried out through numerical modeling, with the hydrodynamic model TELEMAC-3D and the model of sediment transport Psed. The results showed that there is a predominance of northeast winds throughout the year, causing a pile of water in the high estuary, with the elevation of the free surface exceeding 1.2 m. At the mouth of the lagoon, the values were lower, reaching 0.7 m. Regarding the current speeds, there was an acceleration in the access channel, reaching values greater than 0.2 m/s, with peaks between the months of August and October. For the same period, the highest shear stresses and sedimentary erosion rates were found, corresponding to 3.5 N/m<sup>2</sup> and 0.8 m/s, respectively. In addition, spatial analyzes have shown that the west side of the channel was the most affected by erosion events. Thus, the results of this study may contribute to the state of the art in the region, and assist in projects involving the theme.

Keywords: numerical modeling; hydrodynamic; Patos Lagoon; estuary

## INTRODUÇÃO

As lagoas costeiras são áreas continentais inundadas por águas doces ou marinhas, normalmente orientadas paralelamente à linha de costa e conectadas ao oceano através de um ou mais canais (KJERFVE, 1986). Esse encontro de águas forma os estuários, que são caracterizados por um ambiente salobro.

Os ambientes estuarinos são importantes do ponto de vista socioambiental, por servirem de

habitat para inúmeras espécies, contribuindo para a biodiversidade, e favorecendo atividades pesqueiras. Além disso, são locais propícios para o desenvolvimento de portos, influenciando diretamente na economia do país.

Os estuários apresentam uma forte relação entre a hidrodinâmica e a morfodinâmica, resultando em características físicas e químicas variáveis. Sendo assim, a circulação pode ser influenciada significativamente por ventos, ondas, marés, descargas de água doce, ou outros fatores associados ao ecossistema (IGLESIAS et al., 2019).

Além das condições hidrodinâmicas, a morfologia de um estuário pode ser controlada por processos de sedimentação e pela geologia do sistema estuarino. Essas interações podem resultar em variações no fluxo dos sedimentos como deposição e erosão (BALSINHA et al., 2009).

As lagoas costeiras do estado do Rio Grande do Sul têm sua gênese explicada pela formação de sistemas deposicionais do tipo lagoa-barreira, formados pelos vários estágios durante a transgressão marinha pós-glacial (WESCHENFELDER et al., 2014). Com o fechamento das quatro barreiras existentes (I, II, III, IV), houve a formação dos dois principais corpos hídricos do estado, sendo a Lagoa dos Patos e a Lagoa Mirim, com área de 10.000 km<sup>2</sup> e 3.770 km<sup>2</sup>, respectivamente (TOMAZELLI et al., 2000).

A barreira costeira do Rio Grande do Sul tem de 5 a 25 km de largura, e mais de 10 m de elevação, contendo uma conexão permanente entre a Lagoa dos Patos e o Oceano Atlântico Sul. Esse encontro de águas da laguna e do mar, por um canal de 22 km de comprimento, nas proximidades da Praia do Cassino, em Rio Grande, forma o estuário da Lagoa dos Patos.

O estuário da Lagoa dos Patos contribui para a manutenção de ambientes favoráveis à reprodução e desenvolvimento de espécies, com destaque para a tainha, a corvina e o camarão. Além disso, abriga o principal porto do Rio Grande do Sul, responsável por 25% do Produto Interno Bruto (PIB) do estado.

As atividades antropogênicas são capazes de modificar o comportamento hidromorfodinâmico do ambiente (MARTELO et al., 2019; ANTÔNIO

et al., 2020). Como exemplo, é possível citar Bueno et al. (2019), que observaram mudanças na composição dos sedimentos na Lagoa dos Patos, devido às atividades de mineração no Rio Camaquã.

Outro estudo a ser destacado, é o de Calliari et al. (2020), que indica que processos de dragagem no estuário da Lagoa dos Patos, foram responsáveis pelo aumento da frequência de deposição de lama na Praia do Cassino. Portanto, torna-se evidente a importância de estudos relacionados à remobilização sedimentar de uma região, de modo a contribuir com a verificação de processos erosivos e/ou deposicionais.

O movimento dos sedimentos, ao serem transportados através da água, é iniciado pela ação das ondas e/ou correntes. Portanto, dentro de um estuário, os processos hidrodinâmicos são os principais determinantes na distribuição sedimentar (DYER, 1995).

Inserido nesse contexto, o presente artigo tem como principal objetivo analisar o comportamento hidrodinâmico e os aspectos morfodinâmicos do estuário da Lagoa dos Patos, investigando o transporte de sedimentos de fundo, no canal de acesso à laguna. Entender e analisar o comportamento hidrodinâmico e os aspectos morfodinâmicos do estuário da Lagoa dos Patos, é contribuir para uma melhor compreensão de aspectos funcionais do sistema, bem como da sua manutenção. Este trabalho, estudando o transporte de sedimentos de fundo, no canal de acesso à laguna irá contribuir para o aumento do conhecimento atual sobre a dinâmica estuarina de uma das principais lagoas da América do Sul.

### Área de Estudo

A área de estudo está localizada no extremo sul do Brasil, entre 30°S e 32°S e 50°O e 52°O, compreendendo o setor estuarino da Lagoa dos Patos, conforme a Figura 1. A Lagoa dos Patos foi definida por Kjerfve (1986) como uma das maiores lagoas estranguladas do mundo, possuindo uma extensão aproximada de 250 km e largura média de 40 km.

A região estuarina compreende cerca de 1.000 km<sup>2</sup>, ocupando 10% da área total da lagoa

(COSTA et al., 2014), com uma descarga anual de 2088 m<sup>3</sup>/s (MARQUES et al., 2010). A amplitude da maré astronômica é de 0,45m, e a água do mar penetra até 200km ao norte da laguna, em condições de ventos favoráveis (TOLDO et al., 2005).

Na Lagoa dos Patos, a circulação tem como principais forçantes a descarga dos rios e os ventos (MÖLLER et al., 2001; MARQUES et al., 2009, 2014), enquanto o efeito da maré tem importância secundária. Desse modo, com a influência do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), os ventos de nordeste são predominantes na maior parte do ano, causando situações de vazante na lagoa.

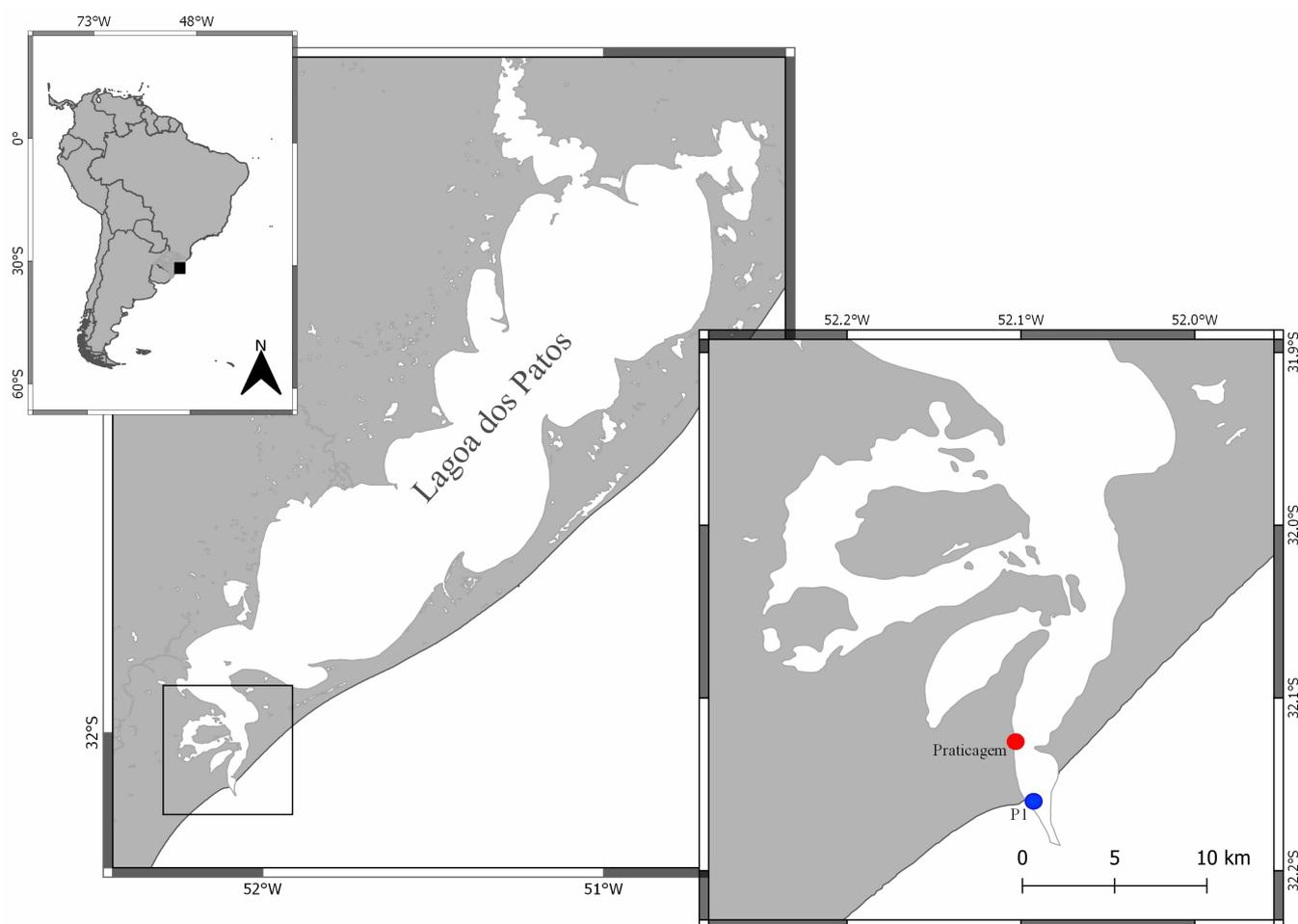
Os ventos de nordeste com baixa descarga fluvial causam uma diminuição no nível de água da laguna nos setores mais ao norte, e um aumento ao sul. Sendo assim, ocasionando um vazamento da água continental para o oceano.

É importante destacar que durante os meses

mais frios do ano, ocorre a passagem de frentes frias, devido aos anticiclones móveis de origem polar, que se propagam para regiões de baixas latitudes. Nessas situações, os ventos de sudoeste e sul são predominantes (MIRANDA et al., 2020), caracterizando eventos de enchente na Lagoa dos Patos.

Como a Lagoa dos Patos é controlado, principalmente, pelos ventos e descargas fluviais, uma grande carga sedimentar oriunda dos rios é carregada em direção a desembocadura do estuário. Esse comportamento causa um assoreamento no canal, dificultando a navegação de grandes embarcações e, portanto, destacando a necessidade de atividades de dragagem.

Dados de análise sedimentar demonstram que a Lagoa dos Patos é uma importante fonte de sedimentos finos para a zona costeira adjacente (CALLIARI et al., 2009). Esses sedimentos provêm dos altos níveis de precipitação na bacia, ocasionando alta descarga fluvial, que causa



**Figura 1.** O mapa da esquerda apresenta a localização geográfica da Lagoa dos Patos. O mapa da direita apresenta a região estuarina da lagoa, com o ponto vermelho indicando a estação de Praticagem, onde será realizada a validação e o ponto P1 em azul onde serão extraídas as séries temporais.

carreamento de enormes quantidades de sedimentos para o corpo lagunar.

Toldo et al. (2006) dividiram a Lagoa dos Patos em duas regiões sedimentológicas e morfológicas distintas. A primeira região constitui 40% de área da laguna, e corresponde às margens arenosas; e a segunda é constituída de silte e silte argiloso (metade norte) e argila siltosa (metade sul).

Argilo-minerais e silte são transportados por suspensão e podem representar até 90% do total de carga sólida transportada por rios (ANDRADE NETO et al., 2012). Além disso, Marques et al., (2010) estimaram uma taxa de exportação de sedimentos da lagoa para o oceano de  $1.37 \times 10^7$  toneladas/ano. Portanto, o conhecimento da dinâmica desses sedimentos é de extrema importância, pois eles interferem na qualidade ambiental e econômica da região, sendo responsáveis pelo assoreamento de reservatórios e portos (SCHETTINI E TOLDO JR., 2006).

## MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido através de modelagem numérica, sendo considerado o modelo hidrodinâmico TELEMAC-3D e o modelo de transporte de sedimentos PSed. As simulações foram conduzidas ao longo de 365 dias, entre 01 de janeiro e 31 de dezembro de 2011, no Centro de Supercomputação (CESUP) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

### Modelos Numéricos

Para analisar os aspectos hidrodinâmicos do estuário da Lagoa dos Patos, foi utilizado o Modelo TELEMAC-3D, que faz parte da suite de modelagem open TELEMAC-MASCARET. Esse modelo é utilizado para estudos de ambientes fluviais, estuarinos e oceânicos, e considera o Método de Elementos Finitos para a discretização espacial e vertical em coordenadas sigma, de forma a acompanhar os limites superficiais e de fundo (HERVOUET, 2007).

O TELEMAC-3D também considera a evolução da superfície livre como função do tempo, e utiliza as equações de advecção-difusão para o

transporte de concentrações de traçadores, como salinidade e temperatura. Além disso, resolve as equações de Navier-Stokes, assumindo ou não condições de pressão hidrostática.

Para análise do transporte de sedimentos de fundo, foi utilizado o Modelo Psed, desenvolvido no *Canadian Hydraulics Centre* (CHC). Este modelo calcula a velocidade de cisalhamento do leito, além da mobilidade, advecção, dispersão, erosão e deposição de sedimentos sob campos de fluxo.

O transporte de sedimentos de fundo calculado pelo Psed, considera diferentes granulometrias e tipos de grão, que devem ser informadas ao sistema no início das simulações. Além disso, os valores de velocidade de corrente calculados pelo modelo hidrodinâmico TELEMAC-3D, ao longo do período simulado, também são utilizados como dados de entrada do Modelo Psed.

### Domínio Numérico

O domínio numérico do presente estudo foi confeccionado no *software Bluekenue*, envolvendo as latitudes  $-30,07^{\circ}\text{S}$  e  $-35,45^{\circ}\text{S}$  e as longitudes  $-53,39^{\circ}\text{O}$  e  $-47,38^{\circ}\text{O}$ , conforme demonstrado anteriormente na Figura 1. Esse domínio compreende toda a Lagoa dos Patos e a zona costeira adjacente, se estendendo até cerca de 3.500 metros de profundidade.

Para garantir uma boa representação das características batimétricas e a morfologia complexa da Lagoa dos Patos e zona costeira adjacente, foi utilizada uma malha batimétrica de elementos finitos triangulares. Foi realizado um refinamento na distribuição desses elementos a fim de melhor representar o ambiente real dentro do domínio computacional.

A distância entre os nós da malha na região oceânica é de no máximo 10 km, enquanto na região costeira e estuarina, essa distância varia de 7 a 100 metros. Regiões como o canal de acesso ao porto, ao redor de ilhas e na desembocadura dos rios, os refinamentos foram mais detalhados.

Os dados batimétricos utilizados para compor o domínio do modelo, foram obtidos de diferentes fontes e interpolados na malha numérica.

Para a Lagoa dos Patos foram utilizados os dados da carta náutica N°2140 da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) da Marinha do Brasil, e para a região oceânica, os dados do GEBCO (*The General Bathymetric Chart of the Oceans*).

No caso de ambientes estuarinos, devido às extremas variações de densidade, é requerida uma boa definição vertical. Desta forma, 15 níveis sigmas foram considerados para definir verticalmente o domínio computacional.

### Condições Iniciais e de Contorno

Para iniciar as simulações, o modelo deve ser configurado com as condições iniciais e de contorno, através de dados extraídos de diferentes fontes. As condições iniciais e de contorno utilizadas estão representadas na Figura 2.

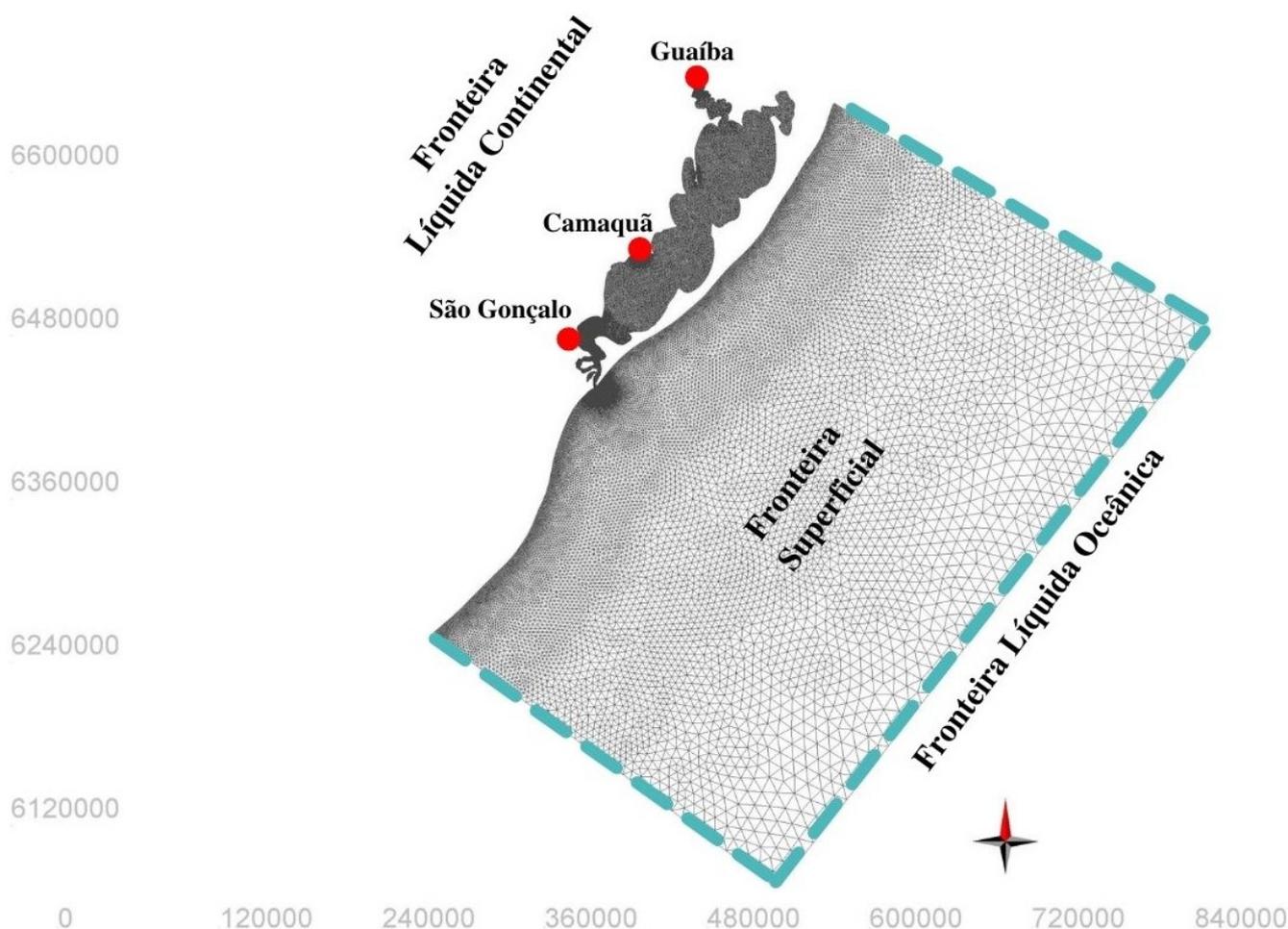
Os dados de velocidade da corrente, salinidade e temperatura da água do mar foram obtidos a partir do modelo HYCOM (*Hybrid Coordinate Ocean Model*), e estão prescritos nas bordas oceânicas do domínio, com resolução

espacial de  $0,083^\circ$ , e escala temporal diária. Além desses, também foram considerados no contorno líquido oceânico, os dados de marés astronômicas, obtidos pelo *OSU Tidal Data Inversion*.

Os dados meteorológicos, representados pela velocidade de vento, temperatura do ar e pressão atmosférica, foram obtidos de dados de reanálise do *ERA-Interim*, do ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*). Esses dados possuem resolução espacial de  $0,125^\circ$ , e escala temporal de 3 horas. Dados de descargas fluviais foram extraídas da página da ANA (Agência Nacional de Águas), e estão prescritos nos contornos continentais líquidos do modelo, para o Lago Guaíba e o Rio Camaquã. Para o Canal São Gonçalo, foi considerada a vazão constante de  $590 \text{ m}^3/\text{s}$ , obtida através do estudo de Oliveira et al. (2015).

### Validação do Modelo Hidrodinâmico

O processo de validação de um modelo consiste em comparar os resultados simulados com



**Figura 2.** Fronteiras líquidas e continental utilizadas no domínio numérico.

dados obtidos em campo (BOURBAN et al., 2012). Desta forma dados de salinidade, temperatura e a componente longitudinal das correntes, foram considerados nesta análise, entre 01 de janeiro e 31 de dezembro de 2011. Para melhor comparação dos resultados, foi realizada uma simulação hidrodinâmica com salvamento de dados de 6 em 6 horas.

Os dados de salinidade e temperatura foram medidos com um sensor de Condutividade e Temperatura (CT), e a componente longitudinal da velocidade das correntes, com um *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP). Todas as medidas foram realizadas na Estação da Praticagem (ponto vermelho, Figura 1) na profundidade de 10 metros. O processo de validação de um modelo consiste em comparar os resultados simulados com dados obtidos em campo. No presente estudo, dados de salinidade, temperatura e a componente longitudinal das correntes, foram considerados nesta análise, entre 01 de janeiro e 31 de dezembro de 2011.

Para melhor avaliar o desempenho do modelo numérico, indicadores de performance foram utilizados de acordo com Hallak & Filho (2011) e suas formulações. Sendo assim, os indicadores de performance e as respectivas equações utilizadas foram:

- Erro Médio Absoluto (MAE) por ser menos afetado por pontos com valores anormalmente extremos, o MAE é considerado preciso e robusto como medida da habilidade de modelos numéricos em reproduzir a realidade (FOX, 1981). Quanto menor o MAE, melhor a concordância entre modelo e observação;

- Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE): expressa a precisão dos resultados numéricos com a vantagem de que o RMSE apresenta valores do erro nas mesmas dimensões da variável analisada (CHAI & DRAXLER, 2014). Quanto menor o RMSE, melhor a concordância entre modelo e observação;

- Relação de Variância (RVar): relaciona o modelo e a observação indicando superestimação ou subestimação. O RVar deve ser próximo a 1, indicando que as variâncias entre dados observados e modelados são iguais.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados apresentados nesse artigo consideram a validação do modelo hidrodinâmico e um período de simulação hidrodinâmica de 365 dias, ao longo do ano de 2011, no estuário da Lagoa dos Patos, no Rio Grande do Sul. Além disso, são apresentadas análises morfodinâmicas, considerando o transporte de fundo no estuário.

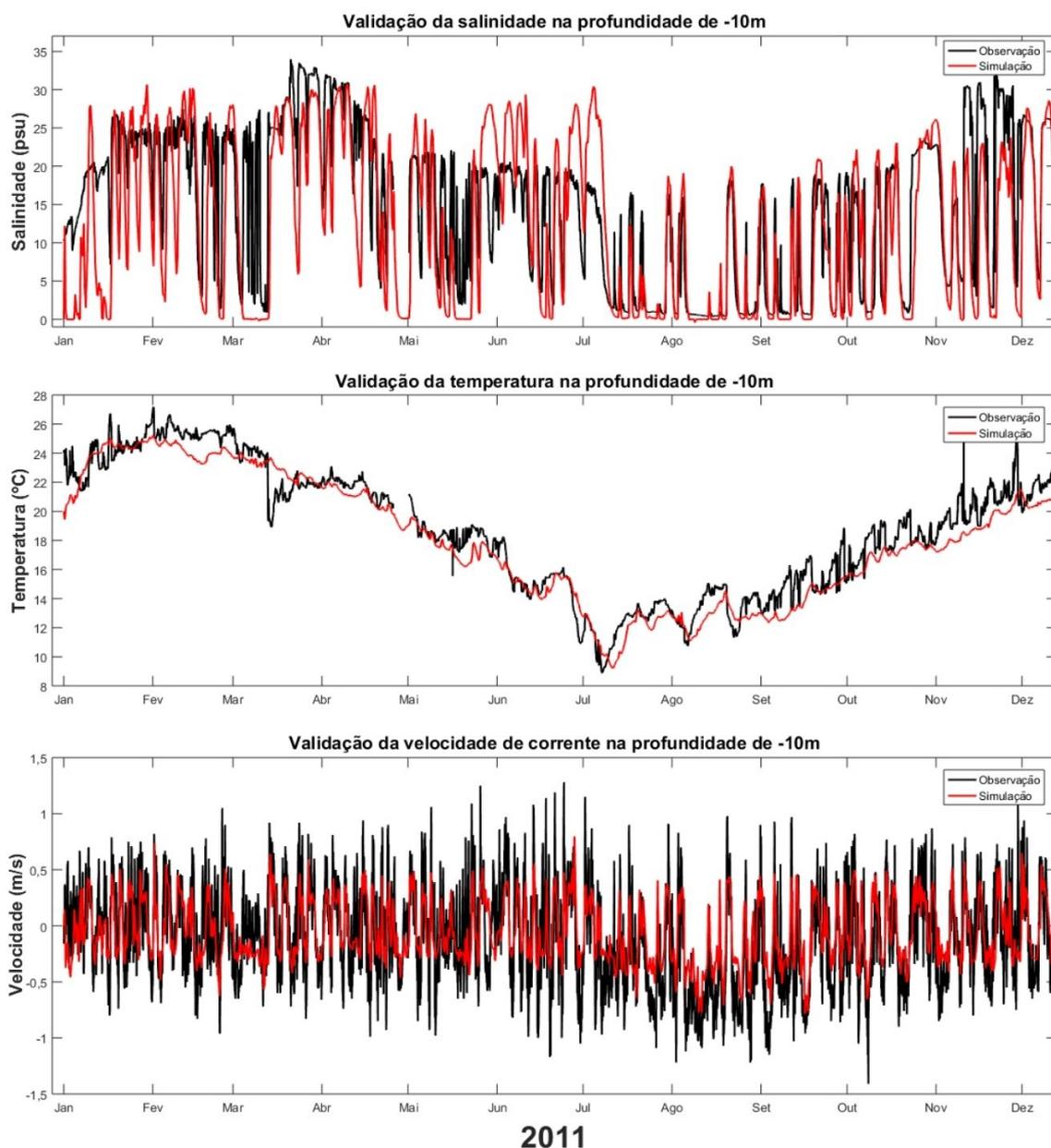
### Validação Hidrodinâmica

As séries temporais demonstrando a comparação entre os resultados das simulações obtidas com o TELEMAC-3D e os dados coletados in situ, estão apresentadas na Figura 3. De modo geral, é possível verificar uma significativa similaridade entre os resultados simulados e observados.

Para a validação da salinidade, observou-se que o modelo TELEMAC-3D possui picos de superestimação em relação a dados observacionais, principalmente nos meses mais frios do ano. Esta discrepância pode estar relacionada à descarga dos rios, uma vez que no Canal São Gonçalo foi necessário considerar uma vazão constante, devido à ausência de dados disponíveis. Dessa forma, as maiores descargas que podem ter ocorrido em junho e julho de 2011, não foram representadas pelo modelo.

Em relação à temperatura, os resultados obtidos com o modelo e coletados em campo se mostraram muito próximos, ao longo de todo o ano de 2011. Em alguns períodos, o modelo apresentou valores mais baixos que os observados, mas de forma pouco significativa.

A componente longitudinal da velocidade de corrente também foi analisada, devido à orientação do canal do estuário da Lagoa dos Patos. Para este parâmetro, notou-se uma subestimação dos resultados modelados, tanto em períodos de vazante (velocidade negativa) como para períodos de enchente (velocidade positiva). Entretanto, o modelo representou adequadamente as tendências de aumento e decréscimo dos parâmetros analisados, demonstrando os padrões sazonais.



**Figura 3.** Séries temporais para validação do modelo hidrodinâmico na Estação da Praticagem, considerando a salinidade, a temperatura e a componente longitudinal da velocidade das correntes, ao longo do ano de 2011. As linhas em preto representam dados observados e em vermelho os dados simulados.

De modo geral, as séries temporais demonstraram uma boa concordância entre os dados modelados e simulados, ao longo de 2011, na Estação da Praticagem. Sendo assim, para complementar os resultados, foi realizada uma análise quantitativa do desempenho do modelo numérico, através de índices estatísticos de

performance, que estão apresentados na Tabela I.

O transporte de sal é um fenômeno complexo, portanto, ao validar a salinidade os erros obtidos são geralmente superiores aos de outros parâmetros (DIAS et al., 2021). O índice com maior erro encontrado para a salinidade foi o RMSE de 8,15, Bitencourt et al. (2020) encontraram um valor

**Tabela I.** Indicadores estatísticos de performance obtidos para a salinidade, temperatura e velocidade de corrente.

Indicadores	Salinidade	Temperatura	Velocidade
MAE	5,7751	1,0051	0,2484
RMSE	8,1524	1,2582	0,3072
RVar	1,1877	0,9501	0,4228

semelhante em seu estudo para a mesma área de estudo.

Em relação a temperatura, foi o parâmetro com ótimo desempenho segundo o índice RVar ( $0,95^\circ \text{C}$ ). Foi obtido um RMSE de  $1,25^\circ \text{C}$ , próximo ao encontrado por Mendes et al. (2021) para o estuário de Mondego.

A velocidade foi o parâmetro com melhor desempenho segundo o MAE e RMSE. O RMSE da velocidade de corrente foi de  $0,30 \text{ m/s}$ , semelhante ao encontrado por Fernandes et al. (2021). Também para o ano de 2011, Martelo et al. (2019) obteve o MAE e RMSE de  $0,20 \text{ m/s}$  e  $0,25 \text{ m/s}$ , respectivamente, valores próximos aos encontrados nesse trabalho. De modo geral, os erros calculados para esse parâmetro são baixos, indicando que o modelo está representando corretamente o padrão de circulação do estuário.

De acordo com os indicadores estatísticos de performance e resultados da literatura, concluiu-se que o modelo hidrodinâmico TELEMAC-3D teve

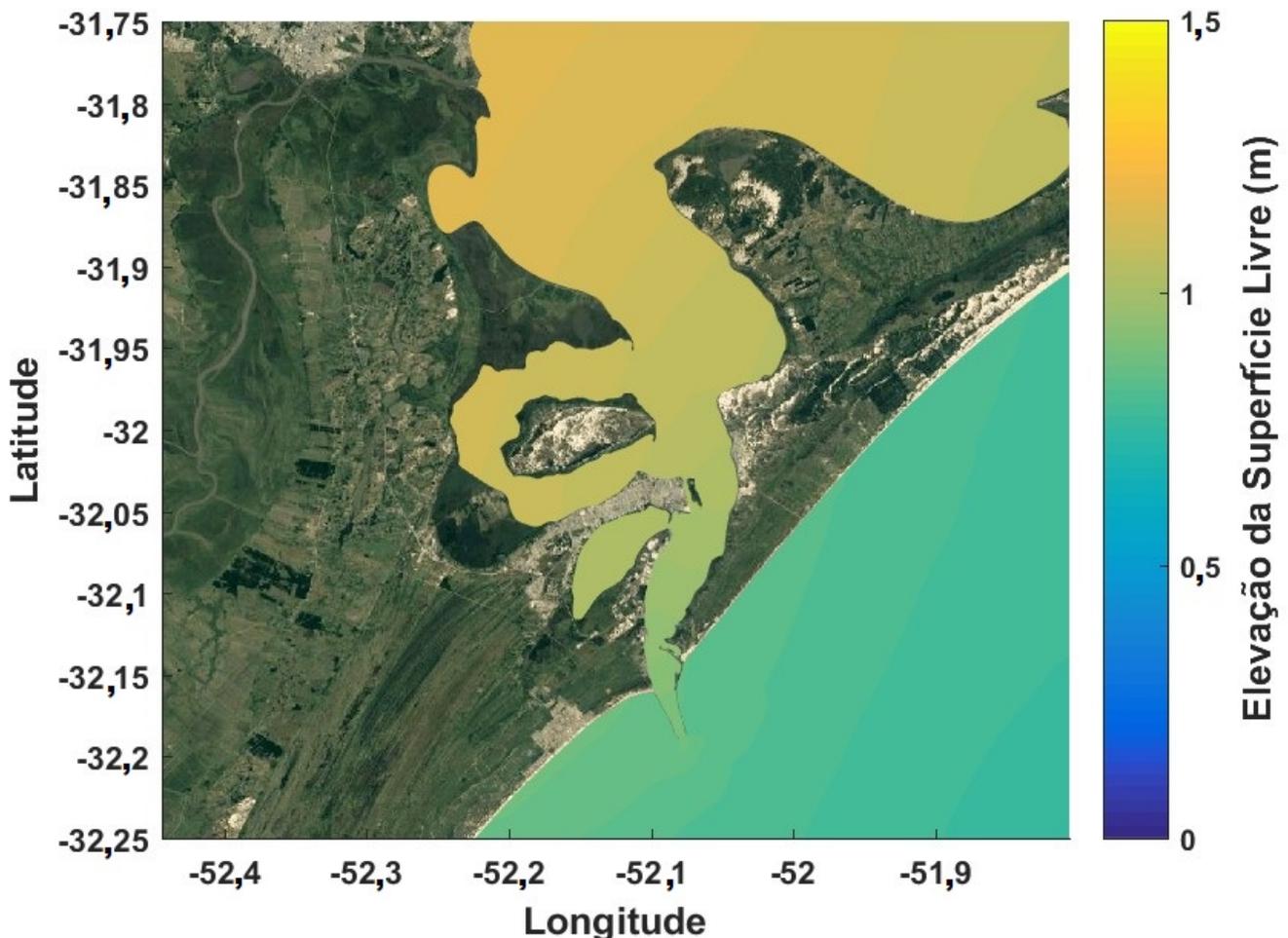
um bom desempenho e representou adequadamente o comportamento hidrodinâmico do estuário da Lagoa dos Patos.

### Hidrodinâmica

O campo médio da elevação da superfície livre, na região do estuário da Lagoa dos Patos, está apresentado na Figura 4. Neste resultado, foi realizada uma análise média para todo o ano de 2011.

É possível observar que os valores médios da elevação da superfície livre são superiores a  $1,2 \text{ m}$  no alto estuário, e diminuem em direção a desembocadura da laguna e ao oceano aberto. Nas proximidades dos molhes, os valores se aproximam de  $0,7 \text{ m}$ .

O vento atuando sobre a água, causa elevação ou abaixamento do nível, devido à transferência de momento. Portanto, a elevação da superfície livre na margem oeste da Lagoa dos



**Figura 4.** Campo médio da elevação de superfície livre, na área de estudo, para o ano de 2011. O mapa de cores representa a intensidade da variável, em metros.

Patos, ocorre devido à incidência de ventos de nordeste, predominantes na região.

Ventos de nordeste causam o empilhamento de água observado no alto estuário, e geram um transporte de água em direção ao sul. Segundo Castelão e Möller Jr. (2003), o oceano adjacente à Lagoa dos Patos é caracterizado por uma depressão no nível, se comparado ao corpo lagunar, devido ao transporte de Ekman gerado pelo vento. Portanto, a geração do gradiente de elevação da superfície livre é responsável por exportar a água da laguna em direção ao oceano aberto.

O campo médio da intensidade das correntes, na região do estuário da Lagoa dos Patos, está apresentado na Figura 5. Neste resultado, foi realizada uma análise média para todo o ano de 2011.

A velocidade das correntes calculada para a região estuarina, demonstra um aumento à medida que a corrente se desloca do canal de acesso em direção ao oceano, atingindo valores superiores a 0,2 m/s. Esse comportamento ocorre devido ao

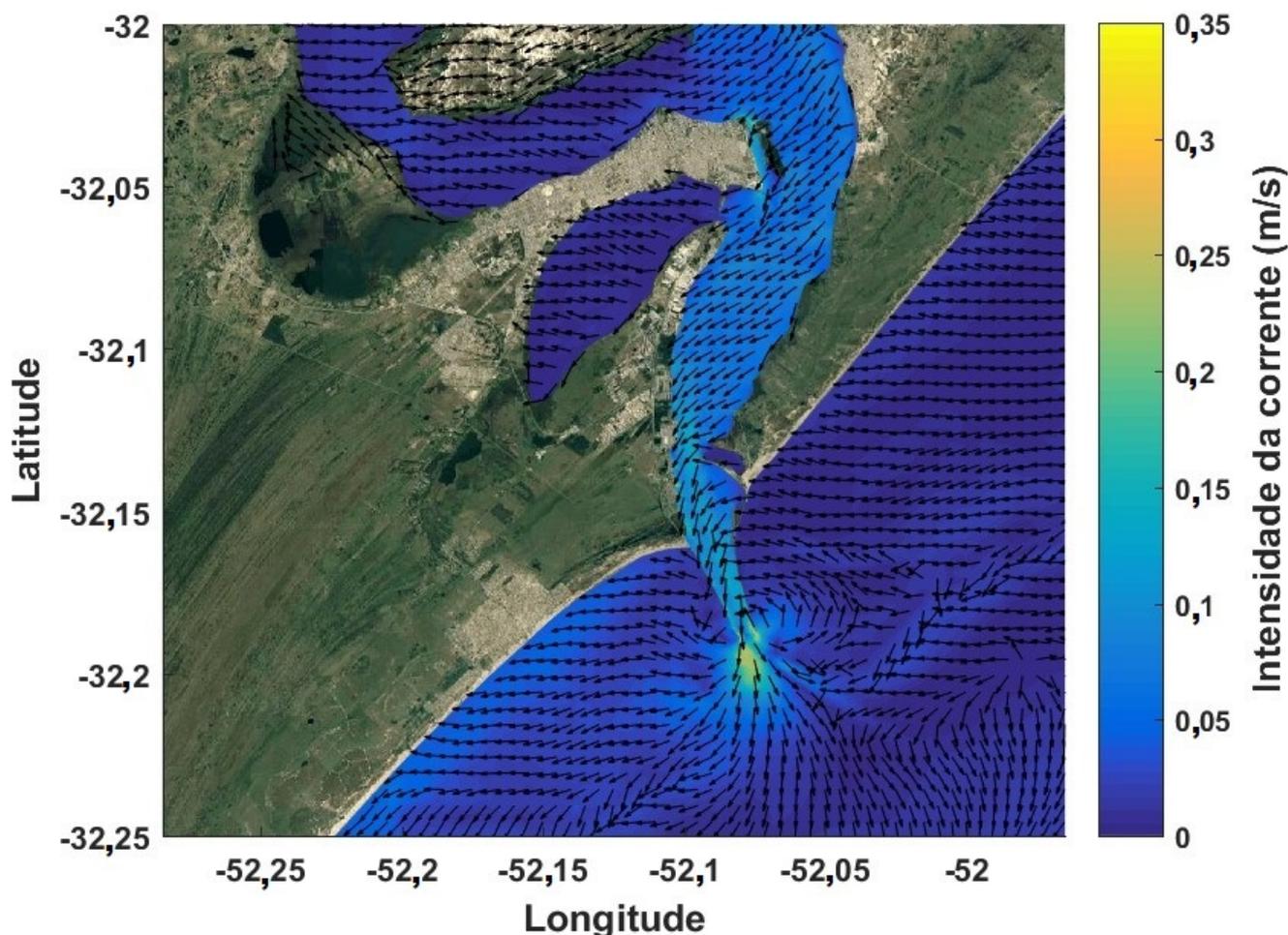
padrão de circulação gerado pela interação da circulação gravitacional e o estreitamento do canal de acesso.

A direção dominante das correntes ocorre de nordeste para sudoeste, indicando a saída de água doce da laguna para o oceano. Além disso, é possível observar a formação de células de recirculação nos setores próximos aos molhes, devido à presença dessa estrutura antropogênica.

### Morfodinâmica

As análises hidromorfodinâmicas que serão apresentadas neste estudo, consideram a componente longitudinal da velocidade superficial das correntes, a tensão de cisalhamento de fundo e a taxa de erosão sedimentar. Estes resultados estão apresentados nas séries temporais da Figura 6, para um ponto localizado (P1, Figura 1) no canal de acesso à Lagoa dos Patos.

As séries temporais da componente longitudinal da velocidade das correntes, extraídas



**Figura 5.** Campo médio da intensidade das correntes, na área de estudo, para o ano de 2011. O mapa de cores representa a intensidade da variável, em metros por segundos, e os vetores pretos representam a direção das correntes.

no canal de entrada do estuário da Lagoa dos Patos, estão apresentadas na Figura 6 (A). Nestas séries, os valores de velocidade positivos representam situações de enchente, e os valores negativos, eventos de vazante.

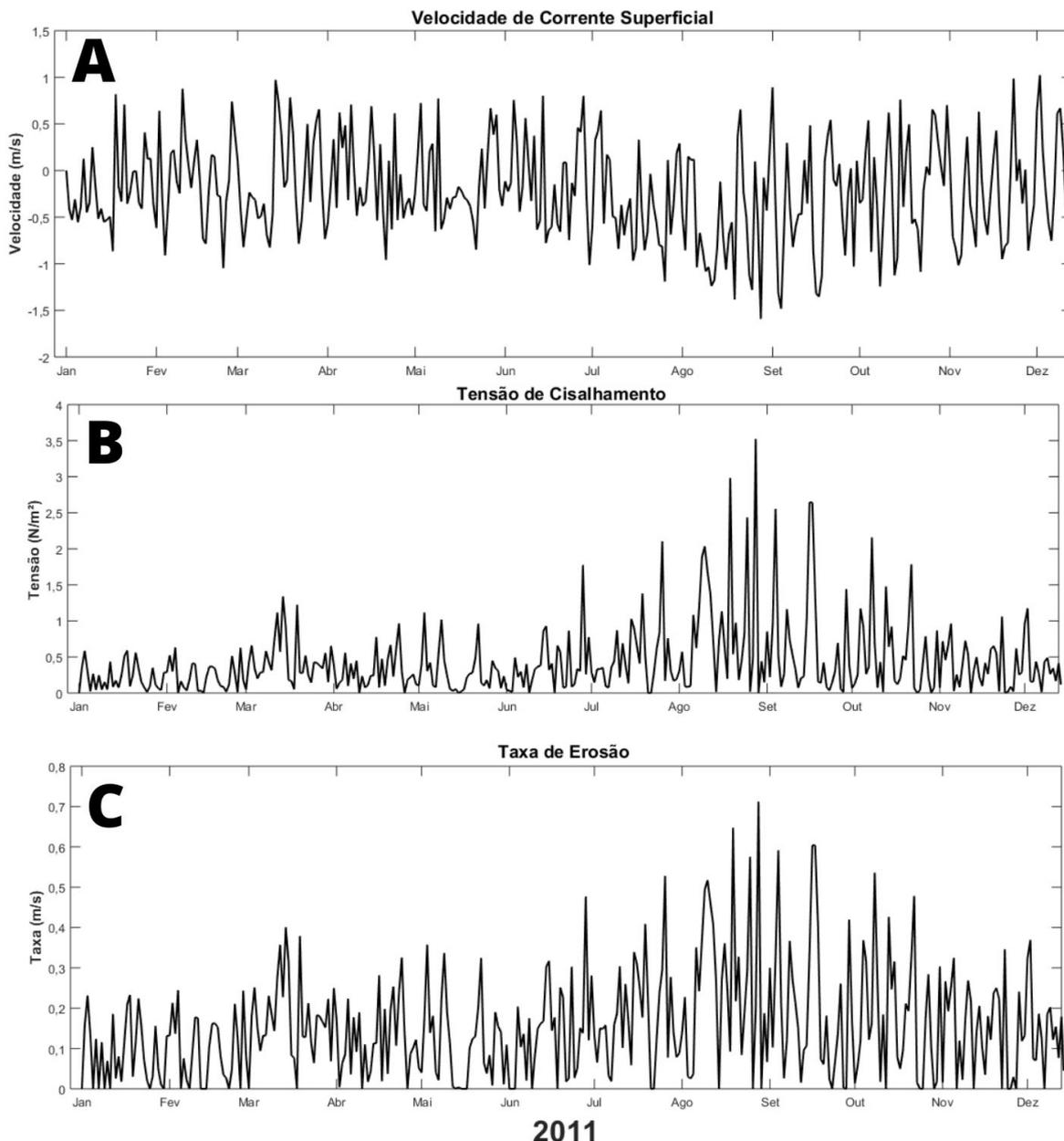
A velocidade das correntes na camada de superfície resultou nos maiores valores durante os períodos próximos à primavera, principalmente entre o final de agosto e o início de outubro. Nesse período, foram observados picos de 1,15 m/s em direção ao norte e de 1,74 m/s em direção ao sul.

As séries temporais da tensão de cisalhamento de fundo, extraídas no canal de entrada (P1, Figura 1) do estuário da Lagoa dos

Patos, estão apresentadas na Figura 6 (B). Nestas séries, os valores médios são de aproximadamente 1 N/m<sup>2</sup>, com situações máximas, entre agosto e outubro, atingindo 3,5 N/m<sup>2</sup>.

O mesmo comportamento observado na Figura 6 (B), pode ser verificado na Figura 6 (C), onde são apresentadas as séries temporais da taxa de erosão sedimentar, para o ano de 2011. A similaridade refere-se aos maiores picos que ocorrem no mesmo período, entre agosto e outubro, atingindo 0,7 m/s.

Entre as camadas hidrodinâmicas e de sedimentos, existe uma camada de interface, na qual ocorrem as transferências de energia das



**Figura 6.** Séries temporais da componente longitudinal da velocidade das correntes na superfície (A), da tensão de cisalhamento de fundo (B) e da taxa de erosão sedimentar (C), para o ano de 2011, no canal de acesso à Lagoa dos Patos.

correntes de fundo, acarretando em processos de transporte junto ao fundo ou em suspensão dos sedimentos. Esse transporte em um canal ocorre sempre que a tensão de cisalhamento imposta pelo fluxo excede um valor limite, denominada tensão de cisalhamento crítica. Conseqüentemente, a erosão ocorre quando a tensão de cisalhamento do fundo for maior que a crítica.

De acordo com Blaas et al. (2007), a efetividade do transporte horizontal do silte depende da mistura vertical obtida através da relação entre a tensão de cisalhamento do vento e a tensão de cisalhamento de fundo, pelo efeito das ondas geradas pelo vento. Corroborando com isso, as maiores taxas de erosão são encontradas em maiores tensões de cisalhamento (Figura 6B e 6C), nos meses de agosto, setembro e outubro.

De forma a complementar os resultados apresentados, foi realizada a análise da tensão de cisalhamento de fundo (em  $N/m^2$ ) e das taxas de erosão sedimentar (em  $m/s$ ), em 28 de agosto de 2011, conforme a Figura 7. A escolha desse dia foi baseada na ocorrência dos valores mais extremos, ao longo de todo o período analisado.

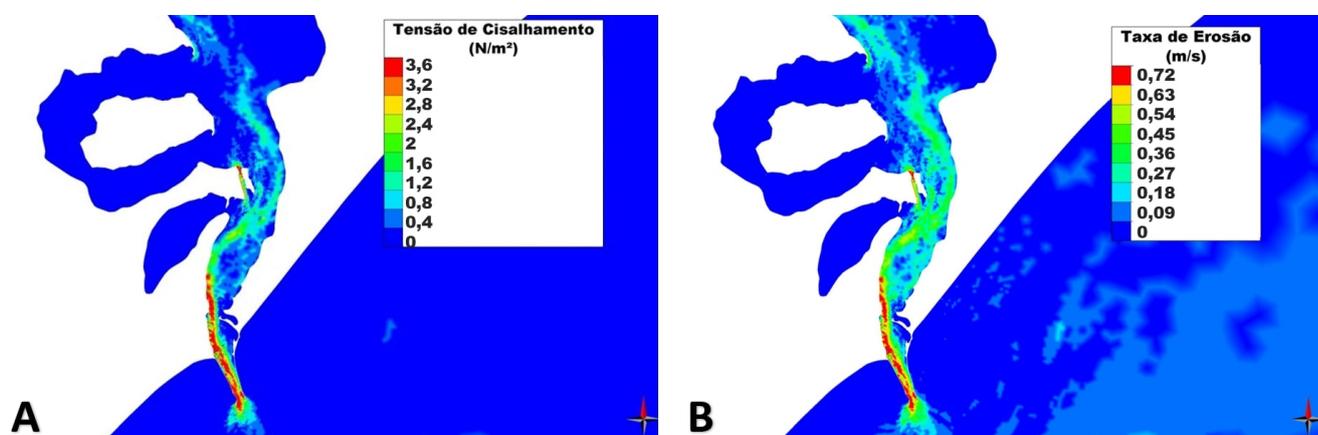
Os resultados demonstram que a tensão de cisalhamento de fundo atingiu aproximadamente  $1 N/m^2$  ao longo do médio e alto estuário, aumentando para valores críticos (próximos a  $3,6 N/m^2$ ) na desembocadura da laguna. O mesmo comportamento foi observado para as taxas de erosão sedimentar, onde os valores variaram de  $0,3 m/s$  a  $0,8 m/s$ , em direção ao canal de acesso.

Os processos de transporte de sedimentos estão sujeitos à influência das condições do local e das características geológicas do leito do estuário e dos sedimentos suspensos existentes. Foi possível verificar, para o dia analisado, que a margem oeste do canal foi a mais afetada por eventos de erosão, apresentando um gradiente em relação à margem leste, uma vez que a diferença foi de aproximadamente  $0,5 m/s$ , devido as maiores velocidades de corrente encontradas nessa região. Segundo Dotterweich (2013), a erosão é um processo natural, porém atividades humanas podem contribuir no aumento das taxas, principalmente em regiões portuárias com mudanças do padrão hidrodinâmico local (FERREIRA & SANTOS, 2018).

## CONCLUSÕES

Os resultados da simulação hidrodinâmica de 365 dias para o ano de 2011, demonstraram o comportamento médio da elevação da superfície livre e da intensidade e direção das correntes. Nessas análises, foi possível concluir que a ação dos ventos de nordeste é predominante na região, causando um empilhamento de água nos setores do alto estuário.

Além disso, os resultados hidrodinâmicos médios demonstraram que os eventos de vazante foram mais frequentes ao longo do período simulado, representados pela direção das correntes de nordeste para sudoeste. É importante destacar que esse comportamento corrobora com estudos



**Figura 7.** Tensão de cisalhamento de fundo (A) e taxa de erosão sedimentar (B) para o dia 28/08/2011, no estuário da Lagoa dos Patos. As barras de cores representam a intensidade das variáveis em Newton por metro quadrado e em metros por segundos, respectivamente. O mapa de cores representa a intensidade da variável, em metros por segundos, e os vetores pretos representam a direção das correntes.

pretéritos disponíveis na literatura (VAZ et al., (2006); MARTELO et al., (2019))

Ao analisar as séries temporais, ao longo de 2011, foi verificado que a velocidade das correntes é mais intensa nos meses de primavera, com picos de 1,15 m/s em direção ao norte e de 1,74 m/s em direção ao sul. Esse comportamento pode ser explicado pela combinação da alta intensidade dos ventos de nordeste e das maiores descargas nesse período.

Nos meses de primavera, a partir de setembro, também foram verificadas as maiores taxas de tensão de cisalhamento de fundo, com valores superiores a 3 N/m<sup>2</sup>. Consequentemente, as taxas de erosão sedimentar também foram mais significativas nesse período, com picos atingindo 0,7 m/s.

Por fim, é importante destacar que a análise do comportamento hidrodinâmico e dos aspectos morfodinâmicos do estuário da Lagoa dos Patos contribuirão com o estado da arte da região. Além disso, a investigação do transporte de sedimentos de fundo no canal de acesso à Lagoa dos Patos, pode auxiliar em projetos que envolvem a temática. Dessa forma, é sugerido que em trabalhos futuros, as taxas de erosão sedimentar sejam analisadas para um período mais longo de tempo.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao consórcio Open TELEMAT-MASCARET por disponibilizar gratuitamente o sistema TELEMAT, ao Laboratório Nacional de Computação Científica (LNCC) pela disponibilidade para uso do Supercomputador Santos Dumont, e ao Centro Nacional de Supercomputação (CESUP) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) pelo apoio ao desenvolvimento desta pesquisa. Este estudo foi apoiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS), Brasil - Contrato 17/2551-001159-7, e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Brasil - Contrato 305780/2019-0.

## REFERÊNCIAS

- ANDRADE NETO, J.; RIGON, L.; TOLDO, E.; SCHETTINI, C. 2012. Descarga sólida em suspensão do sistema fluvial do Guaíba, RS, e sua variabilidade temporal. *Pesquisas em Geociências* 39.2, pp 161–171.
- ANTÔNIO, M.H.P.; FERNANDES & E.H.; MUELBERT, J.H. 2020. Impact of Jetty Configuration Changes on the Hydrodynamics of the Subtropical Patos Lagoon Estuary, Brazil. *Water* 12, 3197. doi:10.3390/w12113197
- BALSINHA, M.; SANTOS, A., ALVES, A.; OLIVEIRA, A. 2009. Textural Composition of Sediments from Minho and Douro Estuaries (Portugal) and Its Relation with Hydrodynamics. *Journal of Coastal Research* pp. 1330-334.
- BITENCOURT, L.P.; FERNANDES, E.H.; SILVA, P.D. & MÖLLER, O.O. 2020. Spatio-temporal variability of suspended sediment concentrations in a shallow and turbid lagoon. *Journal of Marine Systems*. 212, 103454. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2020.103454>
- BLAAS, M.; DONG, C.; MARCHESIELLO, P.; MCWILLIAMS, J.; STOLZENBACH, K. 2007. Sediment-transport modeling on Southern Californian shelves: A ROMS case study. *Continental Shelf Research*, 27, pp 832–853. doi: <https://doi.org/10.1016/j.csr.2006.12.003>
- BOURBAN, S., DURAND, N., TURNBULL, M., WILSON, S., & CHEESEMAN, S. 2012. Coastal Shelf Model of Northern European waters to inform tidal power industry decisions. In Bourban, S., Durand, N., e Hervouet, J.-M., editors, *XIX TELEMAT-MASCARET User Conference*, pages 143–150, Oxford, Inglaterra. HR Wallingford.
- BUENO, C.; FIGUEIRA, R.; IVANOFF, M.; TOLDO JR., E.; FORNARO, L.; RODRÍGUEZ, F. 2019. A multi proxy assessment of long-term anthropogenic impacts in Patos Lagoon, southern Brazil. *Journal of Sedimentary Environments* 4, pp 276-290. doi: 10.12957/jse.2019.44612
- CALLIARI, L.; MACHADO, A.; MARROIG, P.; VINZON, S.; GIANUCA, N. 2020. Mud deposits at Cassino beach: role of dredging. *Geo-Marine Letters* doi: <https://doi.org/10.1007/s00367-019-00619-6>

- CALLIARI, L.; WINTERWERP, J.; FERNANDES, E.; CUCHIARA, D.; VINZON, S.; SPERLE, M.; HOLLAND, K. 2009. Fine grain sediment transport and deposition in the Patos Lagoon–Cassino beach sedimentary system. *Continental Shelf Research* 29.3, pp 515–529.
- CASTELAO, R.; MOLLER JR., O. 2003. Sobre a circulação tridimensional forçada por ventos na Lagoa dos Patos. *Atlântica*, Rio Grande, 25(2): 91-106.
- CHAI, T. & DRAXLER, R. R. 2014. Root mean square error (rmse) or mean absolute error (mae)? *Geoscientific model development*, v. 7, n. 3, p. 1247–1250, doi: 10.5194/gmdd-7m.s-2014.
- COSTA, M.; MUELBERT, J.; MORAES, L.; VIEIRA, J.; CASTELLO, J. 2013. Estuarine early life stage habitat occupancy patterns of whitemouth croaker *Micropogonias furnieri* (Desmarest, 1830) from the Patos Lagoon, Brazil. *Fisheries Research*, 160, pp 77-84. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fishres.2013.10.025>
- DIAS, J.M.; PEREIRA, F.; PICADO, A.; LOPES, C.L.; PINHEIRO, J.P.; LOPES, S.M. & PINHO, P.G. 2021. A Comprehensive Estuarine Hydrodynamics-Salinity Study: Impact of Morphologic Changes on Ria de Aveiro (Atlantic Coast of Portugal). *Journal of Marine Science Engineering*. 9, 234. <https://doi.org/10.3390/jmse9020234>
- DOTTERWEICH, M. 2013. The history of human-induced soil erosion: Geomorphic legacies, early descriptions and research, and the development of soil conservation—A global synopsis. *Geomorphology*, 201, p 34. doi: 10.1016/j.geomorph.2013.07.021
- DYER, K. Sediment transport processes in estuaries. 1995. *Geomorphology and Sedimentology of estuaries*. Developments in Sedimentology. Cap. 14, pp. 423–449
- FERNANDES, E.H.; DA SILVA, P.D.; GONÇALVES, G.A. & MÖLLER, O.O., JR. 2021. Dispersion Plumes in Open Ocean Disposal Sites of Dredged Sediment. *Water*, 13, 808. <https://doi.org/10.3390/w13060808>
- FERREIRA, A. M. G. S., & SANTOS, C. S. N. 2018. Sedimentation and Erosion in Harbor Estuaries. *Sedimentation Engineering*. doi:10.5772/intechopen.74049
- FOX, D. JUDGING AIR QUALITY MODEL PERFORMANCE. 1981. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 62, pp 599–609.
- HALLAK, R. & FILHO, A. J. P. 2011. Metodologia para análise de desempenho de simulações de sistemas convectivos na região metropolitana de São Paulo com o modelo ARPS: sensibilidade a variações com os esquemas de advecção e assimilação de dados. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 26(4):591–608.
- HERVOUET, J. 2007. *Hydrodynamics of Free Surface Flows: modelling with the finite element method*. England: John Wiley and Sons Ltd.
- IGLESIAS, I.; VALENTE, P.; BIO, A.; BASTOS, L. 2019. Modelling the Main Hydrodynamic Patterns in Shallow Water Estuaries: The Minho Case Study. *Water* 11, 1040. doi: <https://doi.org/10.3390/w11051040>
- KJERFVE, B. Comparative Oceanography of Coastal Lagoons. *Estuarine Variability*. 1986, pp 63–81.
- MARQUES, W.; FERNANDES, E.; MONTEIRO, I.; MOLLER JR., O. 2009. Numerical modeling of the Patos Lagoon coastal plume, Brazil. *Continental Shelf Research* 29, pp. 556–571. doi:10.1016/j.csr.2008.09.022
- MARQUES, W.; FERNANDES, E.; MORAES, B.; MÖLLER JR., O.; MALCHEREK, A. 2010. Dynamics of the Patos Lagoon coastal plume and its contribution to the deposition pattern of the southern Brazilian inner shelf. *Journal of Geophysical Research*, 115. doi:10.1029/2010JC006190
- MARQUES, W.; STRINGARI, C.; EIDT, R. 2014. The exchange processes of the Patos Lagoon Estuary-Brazil: a typical El Niño year versus a normal meteorological conditions year. *Adv. Water Resour.* 2 pp 11-19.
- MARTELO, A. F., TROMBETTA, T.B., LOPES, B.V., MARQUES, W.C. & MÖLLER JR., O.O. 2019. Impacts of dredging on the hydromorphodynamics of the Patos Lagoon estuary, southern Brazil. In: *Ocean Engineering*, 188, doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106325>
- MENDES, J.; RUELA, R.; PICADO, A.; PINHEIRO, J.P.; RIBEIRO, A.S.; PEREIRA, H. & DIAS, J.M. 2021. Modeling Dynamic Processes of

Mondego Estuary and Óbidos Lagoon Using Delft3D. *Journal of Marine Science and Engineering*. 9, 91. <https://doi.org/10.3390/jmse9010091>

MIRANDA, I.; TOLDO, E.; KLEIN, A.; STRAUSSET, D.; SILVA, G. 2020. The role of cusped spits on wave attenuation and energy redistribution in a coastal lagoon, Lagoa dos Patos, Brazil. *Geo-Marine Lett.* <https://doi.org/10.1007/s00367-019-00632-9>

MÖLLER JR., O.; CASTAING, P.; SALOMON, J.; LAZURE, P. 2001. The Influence of Local and Non-Local Forcing Effects on the Subtidal Circulation of Patos Lagoon. *Estuaries* 24.2, p 297.

OLIVEIRA, H.; FERNANDES, E.; MOLLER, JR., O.; COLLARES, G. 2015. Processos Hidrológicos e Hidrodinâmicos da Lagoa Mirim. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 20, pp 34 – 45.

SCHETTINI, C.; TOLDO, 2006. E. Fine sediment transport modes in the Itajai-Açu estuary, Southern Brazil. *Proceedings of the 2006 International Coastal Symposium* pp 515-519.

TOLDO, E.; DILLENBURG, S.; ALMEIDA, L.; WESCHENFELDER, J.; GRUBER, N. 2006. Sedimentação de longo e curto período na Lagoa dos Patos, Sul do Brasil. *Pesquisas em Geociências* 33.2, pp 79–86.

TOLDO, E.; DILLENBURG, S.; CORREA, I.; LUIZ; ALMEIDA, E.; WESCHENFELDER, J. 2005. Sedimentação na Lagoa dos Patos e os impactos ambientais. *ABEQUA* 1 pp 1-6.

TOMAZELLI, L.; DILLENBURG, S.; VILLWOCK, J. 2000. Late quaternary geological history of Rio Grande do Sul coastal plain, southern Brazil. *Revista Brasileira de Geociências* 30, pp 474-476.

VAZ, A. C., MÖLLER JUNIOR, O. O., & ALMEIDA, T. L. D. 2006. Análise quantitativa da descarga dos rios afluentes da Lagoa dos Patos. *Atlântica* 28, 13–23.

WESCHENFELDER, J.; BAITELLI, R.; CORREA, I.; BORTOLIN, E.; SANTOS, C. 2014. Quaternary incised valleys in southern Brazil coastal zone. *Journal of South American Earth Sciences*. 55, pp 83-93. doi :<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2014.07.004>