

**FORÇANTES EXTERNAS DOMINANTES NOS PROCESSOS
HIDRODINÂMICOS NA REGIÃO DO SACO DA MANGUEIRA NA
LAGOA DOS PATOS-RS**
***EXTERNAL KEY FORCES TO HYDRODYNAMIC PROCESSES IN THE
REGION OF MANGUEIRA BAY IN THE PATOS LAGOON-RS***

Thalita Fagundes Leal¹
Bruno Vasconcellos Lopes²
Eduardo de Paula Kirinus³
Caroline Barbosa Monteiro⁴
Mauren Costa da Silva⁵
Osmar Olinto Möller Júnior⁶
Phelype Haron Oleinik⁷
Thaísa Beloti Trombetta⁸
Wiliam Correia Marques⁹

Resumo: O Saco da Mangueira é uma enseada semifechada com acesso a região estuarina da Lagoa dos Patos-RS. Esse sistema possui uma área de 227km² e recebe pequenas descargas de água doce provenientes dos arroios Vieira e Simão, porém o maior aporte de água que esta enseada recebe provém do estuário da Lagoa dos Patos. Nesta região são realizadas várias atividades, como pesca artesanal de camarão e atividades de lazer. A análise da hidrodinâmica nesta região é importante, pois a circulação do fluxo de água entre a enseada

¹ Mestranda em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande, thalitaestefan-fisica@hotmail.com.

² Mestre em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande, lopesbruno13@gmail.com.

³ Doutor em Oceanologia Física, Química e Geológica, Universidade Federal do Rio Grande, ekirinus@gmail.com.

⁴ Doutoranda em Oceanologia, Universidade Federal do Rio Grande, monteirocbm@gmail.com.

⁵ Mestranda em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande, mauren_costa@hotmail.com.

⁶ Doutor em Oceanologia, Universidade Federal do Rio Grande, dfsomj@furg.com.

⁷ Mestrando em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande, phe.h.o1@gmail.com.

⁸ Mestranda em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande, thaissa_bt@hotmail.com.

⁹ Doutor em Oceanologia, Universidade Federal do Rio Grande, wilianmarques47@gmail.com.

e o estuário promovem a entrada de nutrientes e evitam condições anóxicas no ambiente. O objetivo principal deste estudo é investigar a hidrodinâmica do local usando o modelo de simulação numérica TELEMAC-3D validado com dados medidos em campo. Os resultados demonstram que a dinâmica do Saco da Mangueira está fortemente relacionada com a dinâmica estuarina, sendo controlada pelo efeito não-local do vento. A elevação do nível do mar e os gradientes de pressão entre os pontos analisados proporcionam a direção do fluxo de água, associados aos ventos, ocasionando eventos de enchente de água salgada (ventos de sudoeste) e vazão de água doce (ventos de nordeste) no Saco da Mangueira.

Palavras-chave: modelagem numérica. hidrodinâmica. Telemac-3d. Saco da Mangueira.

Abstract: Mangueira Bay is a semi-enclosed cove with access to the estuarine region of Patos Lagoon. This system has an area of 227km² and receives small freshwater discharges from the Vieira and Simão streams, but the largest entrance of water this stream receives comes from the estuary of Lagoa dos Patos. In this region there are various activities, such as artisanal shrimp fishing and leisure activities. The analysis of the hydrodynamics in this region is important, as the circulation of the water flow between the estuary and the estuary promotes the entry of nutrients and avoids anoxic conditions in the environment. The main objective of this study is to investigate the hydrodynamics of the site using the numeric validation model TELEMAC-3D with data measured in the field. The results showed that the dynamics of the Mangueira Bay are related to the estuarine dynamics, which is strongly controlled by the non local effect of the wind. The sea level height and pressure gradients between the analyzed points provide the direction of the water flow, associated with the winds effect, where salt water flood events (southwest winds) and sweet water ebb (northeast winds) flows occur in Mangueira Bay.

Keywords: numerical modeling. hydrodynamics. Telemac-3d. Mangueira Bay.

1 INTRODUÇÃO

O Saco da Mangueira é uma enseada semifechada com acesso a região estuarina da Lagoa dos Patos-RS. Nesta região são realizadas várias atividades econômicas de suporte ao parque industrial da cidade de Rio Grande, além da pesca artesanal de camarão e atividades de lazer (MONTEIRO, 2006). A enseada é um corpo de água rasa e recebe pequenas contribuições de água doce provenientes de dois arroios locais. A maior contribuição de água que a enseada recebe provém do estuário da Lagoa dos Patos.

A grande variabilidade temporal e espacial observada na região estuarina sugere que um estudo mais detalhado da hidrodinâmica desta região, e de suas enseadas rasas, não pode ser realizado somente com base em estudos de campo, pois para tal seria necessário um grande número de observações, gerando alto custo associado (MONTEIRO, 2006).

A análise da hidrodinâmica nesta região é importante, pois a circulação do fluxo de água entre Saco da Mangueira, estuário da Lagoa dos Patos e a planície costeira adjacente (influenciado pela ação vento local e não-local), promove entrada de nutrientes (entrada de sal) e evitam as condições anóxicas na enseada. Os estudos sobre a hidrodinâmica no Saco da Mangueira são escassos, porém são necessários para o estabelecimento de um plano de recuperação e manejo deste sistema (PEREIRA, 1997; MONTEIRO, 2006).

A dinâmica da região depende do vento e da descarga de água doce (MÖLLER, 1996; BARROS, 2014). De acordo MÖLLER (1996), o efeito do vento é importante na circulação de água na região de estudo, pois a dimensão e à orientação do eixo longitudinal da lagoa (nordestesudoeste), coincide com a direção predominante dos ventos. O regime de ventos dominante na região é o de nordeste, associado ao anticiclone sobre o Oceano Atlântico (KIRINUS, 2018 apud PARISE, 2009). Durante o verão e a primavera possui ventos de leste (influência da brisa do mar), enquanto que no outono e inverno ventos de sudoeste (sistemas frontais). Porém, em escalas de longo período (meses, anos e mais), a descarga de água doce torna-se importante na análise da hidrodinâmica (BARROS, 2014).

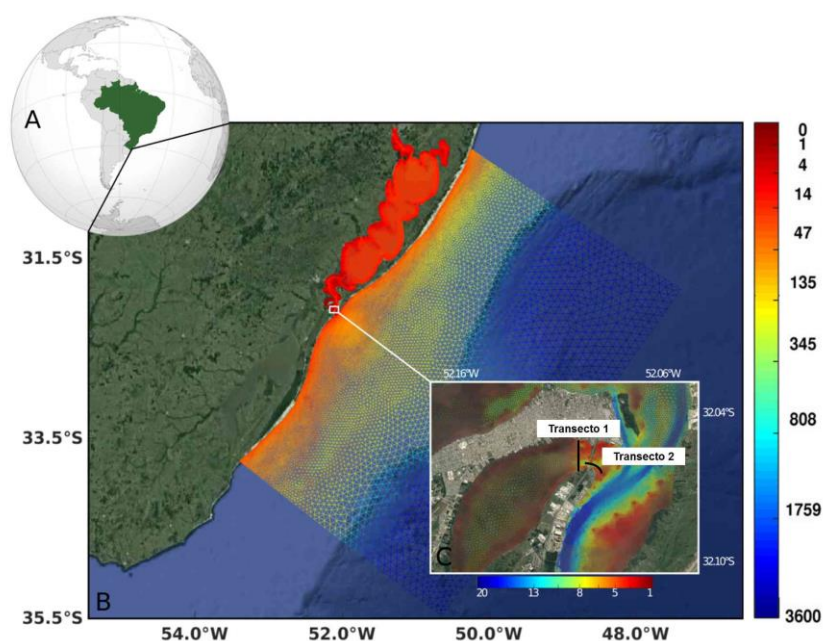
Sendo assim, entender as condições que controlam a circulação do fluxo de água, como os processos de troca de água, a distribuição da salinidade e as variações na elevação do nível médio da água em escalas temporais longas, possibilita uma análise hidrodinâmica e a identificação das mudanças que podem afetar as atividades econômicas desenvolvidas no Saco da Mangueira.

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo o estudo tridimensional da hidrodinâmica no Saco da Mangueira, através do uso do modelo TELEMAC-3D, fornecendo resultados que auxiliarão em compreensões fundamentais do comportamento do fluxo de água, para um período de 4 anos (2010 a 2013).

1.1 Localização e Características da Região de Estudo

O Saco da Mangueira (Figura 1) é um sistema raso, com profundidade média de 1m, conectado ao baixo estuário da Lagoa dos Patos por canal de acesso com 240 m de largura. Esse sistema possui uma área de 227 km² e recebe pequenas descargas de água doce provenientes dos arroios Vieira e Simão.

Figura 1 – Localização global da região de estudo (A), representação batimétrica da área costeira e da Lagoa dos Patos, com cores representando a profundidade em metros (B), sobreposta da Google maps, LANDSAT/Copernicus, data 2018. A zona destacada é o Saco da Mangueira (C), com a localização do transecto vertical (Transecto 1) e longitudinal (Transecto 2), a figura C está sobreposta da Google Maps, Digital GLOBE CNES/Airbus, data 2018.



A Lagoa dos Patos está localizada na região sul do Brasil, entre 30°-32°S e 50°-52°W, sendo que o estuário está conectado ao Oceano Atlântico Sul através de um canal de entrada de 20 km de comprimento (FERNANDES, 2004). A lagoa possui uma superfície de 10.360 km² e profundidade média de aproximadamente 5m (MARQUES, 2009), sendo assim classificada como uma lagoa rasa (CALLIARI, 2009).

A dinâmica da Lagoa dos Patos depende essencialmente do vento e da descarga de água doce (MÖLLER, 1996). O vento atuando localmente sobre o corpo da lagoa produz uma configuração no padrão de circulação (set-up / set-down) durante os períodos de ventos de Nordeste-Sudoeste, enquanto as oscilações de mais longo período, geradas na região costeira por ação remota dos ventos são atenuadas à medida que se propagam para o interior da lagoa (MÖLLER, 1996; MÖLLER, 2001; FERNANDES, 2002). A combinação da ação local e remota dos ventos é o principal mecanismo que controla a introdução de sal na região estuarina (HARTMANN, 1991; MÖLLER, 2001).

O efeito do vento tem uma contribuição importante na circulação do fluxo de água na lagoa, devido a sua dimensão e a orientação do eixo longitudinal (nordeste-sudoeste) coincidir com a direção predominante dos ventos. O vento de nordeste, atuando sobre a lagoa, gera um fluxo de águas em direção ao sul, causando uma depressão no nível da lagoa na parte norte (Itapoã) e uma elevação na parte sul (Ponta da Feitoria), assim gerando um gradiente de pressão em direção ao oceano e contribuindo a saída do fluxo de água da lagoa. O vento de sudoeste, atuando sobre a lagoa, gera um fluxo de água em direção ao norte, causando uma depressão no nível da lagoa na parte sul (Ponta da Feitoria) e uma elevação na parte norte, assim gerando um gradiente de pressão em direção à Lagoa e contribuindo para a entrada do fluxo de água na lagoa (FERNANDES, 2002; MÖLLER, 2001; CASTELÃO, 2003).

Os maiores rios ao Sul do Brasil descarregam suas águas nesta lagoa. Os principais rios contribuintes estão ao norte da lagoa e apresentam um padrão de descarga típico de regiões temperadas influenciadas por processos de ordem climática (MARQUES, 2009). Os rios que desembocam na lagoa têm uma área total de captação de aproximadamente 201.626 km², e estes exibem um padrão típico de médias latitudes, com alta descarga no final do inverno e

no início da primavera, seguido de baixa a moderada descarga, no verão e no outono (JANEIRO, 2008).

Os principais rios tributários são os rios Jacuí e Taquari, os quais descarregam suas águas através do rio Guaíba, com uma vazão média anual de 2000 m³/s e o rio Camaquã, que deságua na região central da laguna, com uma vazão média anual de 400 m³s⁻¹ (MARQUES, 2010). Picos extremos de descarga de 25.000 m³/s e 16.000 m³s⁻¹ foram observados por Marques (2005). O canal de São Gonçalo possui 78 km de extensão que liga a Lagoa Mirim a Lagoa dos Patos. As águas da Lagoa Mirim são drenadas em sua maioria em direção ao canal São Gonçalo, que por sua vez descarrega no estuário da Lagoa dos Patos (COSTI, 2018).

2 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho consiste na utilização de modelagem numérica e análise direta dos resultados obtidos. O sistema de modelagem numérica utilizado é o open TELEMAC-MASCARET, através do módulo hidrodinâmico TELEMAC-3D (HERVOUET, 2007). O módulo TELEMAC-3D é utilizado para estudos hidrodinâmicos tridimensionais de fluxos de águas rasas. Os resultados serão analisados na forma de séries temporais de elevação, desnível (diferença de nível entre os pontos selecionados na região de estudo), vento e gradiente de pressão. A metodologia utilizada para análise das séries temporais foi proposta por Monteiro (2006).

A malha computacional foi gerada através do software *Blue Kenue*. A variação no tamanho dos elementos no domínio é de 11.000 m, na zona oceânica, 300m na Lagoa dos Patos, 100m da embocadura da Lagoa dos Patos e 30m na região do Saco da Mangueira, com um total de 93.050 nós.

Os dados de batimetria da região de estudo foram extraídos e digitalizados a partir das cartas náuticas cedidos pela Diretoria de Hidrografia e Navegação DNH (Diretoria de Hidrografia e Navegação). As cartas utilizadas foram 2140 (Lagoa dos Patos), 2350 (Pinhal ao Rio Grande) e 2112 (Rio

Grande ao Arroio Chuí). Os dados de batimetria foram interpolados para cada nó do domínio da malha computacional.

2.1 Modelo Hidrodinâmico TELEMAC-3D e parametrização.

O TELEMAC-3D é um software computacional que auxilia no estudo hidrodinâmico, este modelo é projetado para estudar oceanos, zonas costeiras, estuários e lagos (KIRINUS, 2018). O modelo resolve as equações de Navier-Stokes considerando a variação local da superfície livre e desprezando a variação de densidade na equação de conservação de massa e considerando a aproximação de Boussinesq para resolver as equações do movimento. Para uma descrição matemática detalhada do modelo ver: Hervouet (2007).

O TELEMAC-3D resolve as equações hidrodinâmicas operando em malhar de elementos finitos, com base triangular, usando o sistema de coordenadas sigma na discretização vertical, que acompanham os limites superficiais e de fundo. O método *Multidimensional Upwind Residual Distribution* (MURD) é aplicado para a advecção de variáveis tridimensionais. Para as condições de contorno do TELEMAC-3D são aplicadas de acordo com os métodos advectivos e difusivos. A advecção e difusão de velocidades e traçadores são resolvidos usando métodos característicos.

Para simular as condições hidrodinâmicas o modelo TELEMAC-3D utiliza quatro banco de dados distintos, os oceanográficos do HYCOM (velocidade de corrente, temperatura da água do mar e salinidade) para forçar os limites do modelo, os meteorológicos do ERA-Interim (velocidade dos ventos, temperatura do ar e pressão atmosférica) para forçar os limites superficiais e de fundo, os de maré astronômica do FES (*Finite Element Solution*) Grenoble e de descarga fluvial da Agência Nacional de Águas (ANA) que contabilizam dados dos rios Guaíba, Camaquã e São Gonçalo.

As simulações hidrodinâmicas utilizadas para avaliação da qualidade dos resultados abrangem um período de 4 anos, que compreende 2010 a 2013. Os principais parâmetros utilizados nas simulações numéricas são apresentados na Tabela 1, e seus valores estão baseados na calibração e

validação do modelo TELEMAC-3D de acordo com Marques (2009), Marques (2012), Marques (2014) e Marques (2017).

Tabela 1 – Parâmetros utilizados na simulação numérica.

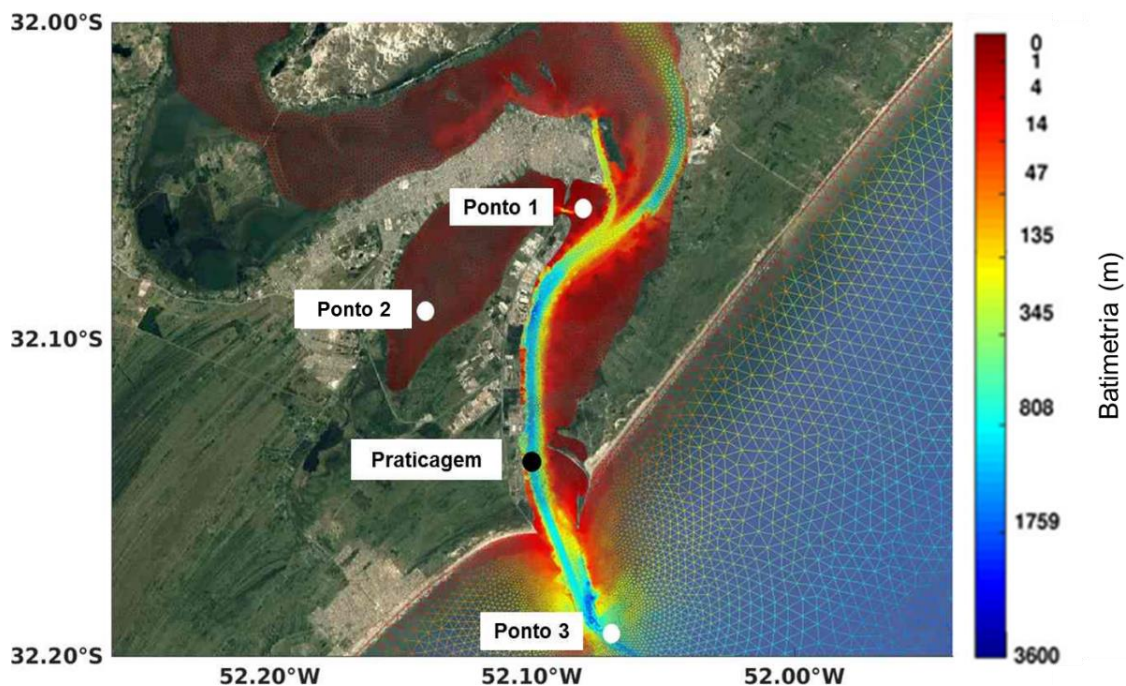
Tipo de Fonte	Empréstimo
Passo de tempo	60
Tempo de simulação	4 anos
Número de passo de tempo	3191040
Modelo de turbulência horizontal	Smagorinsky
Modelo de turbulência vertical	Mixing Length (Jet)
Coefficiente de coriolis	$-7,770735 \cdot 10^{-5} \text{m}^{-1} \text{s}^{-1}$
Lei de atrito com o fundo	Manning
Escala de comprimento de mistura	10 m
Coefficiente de atrito com o fundo	$4 \cdot 10^{-2}$
Coefficiente de atrito com o vento	$8 \cdot 10^{-6}$

3 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS HIDRODINÂMICOS

O modelo TELEMAC-3D foi validado para a investigação dos processos hidrodinâmicos de acordo com Marques (2009), Marques (2012), Marques (2014) e Marques (2017), usando uma parametrização semelhante para realizar a validação das simulações numéricas tridimensionais.

A validação foi realizada a partir da comparação de medidas de séries temporais calculadas pelo modelo e séries temporais medidas em campo. Neste caso, o resultado hidrodinâmico da simulação foi comparado com as observações das velocidades de corrente e salinidade medidas no canal de acesso a Lagoa dos Patos, na Estação da Praticagem indicado na Figura 2, para o período de 06/01/2011 a 30/01/2011.

Figura 2 – Posição do Equipamento: Ponto preto indica a posição do ADCP no canal de acesso da Lagoa dos Patos, nas coordenadas 32°8'12" S e 52° 6' 9" W. Os pontos 1,2 e 3 em branco indicam onde foram extraídas as séries temporais de elevação.



Os dados de corrente foram obtidos com um *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP) posicionado no canal de navegação, fundeado a uma profundidade de 12m. Para melhorar a comparação entre as séries temporais, foi utilizado um filtro *cossenoidal Lanczos* para remover as oscilações de alta frequência (períodos inferiores a 12 h) das séries temporais. Os dados de salinidade foram obtidos utilizando um sensor de Condutividade e Temperatura (CT) posicionado no mesmo ponto do canal de navegação, em uma profundidade de 3m.

As Figuras 3 e 4 apresentam as comparações entre as séries temporais com dados observados (DO) e os dados calculados (DC), obtidos através da simulação numérica.

Figura 3 – Velocidade Meridional. Em preto são representados os dados observados (D.O) e em verde são apresentados os dados calculados pelo modelo (D.C).

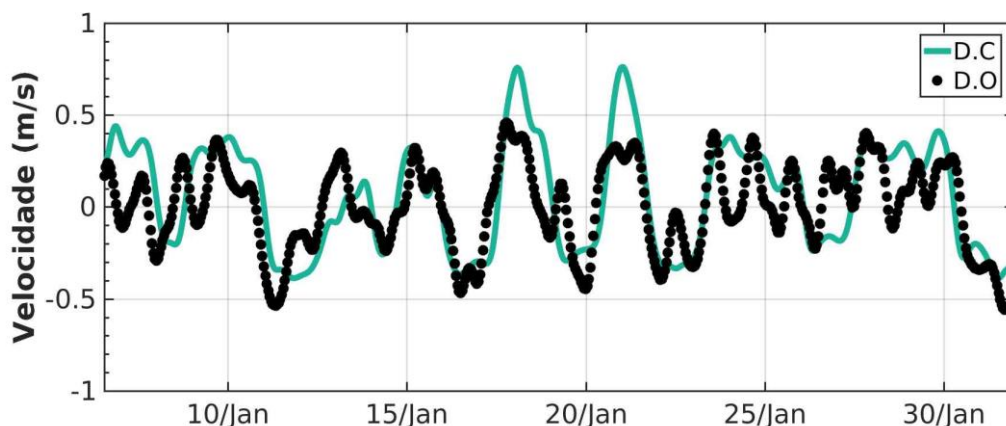
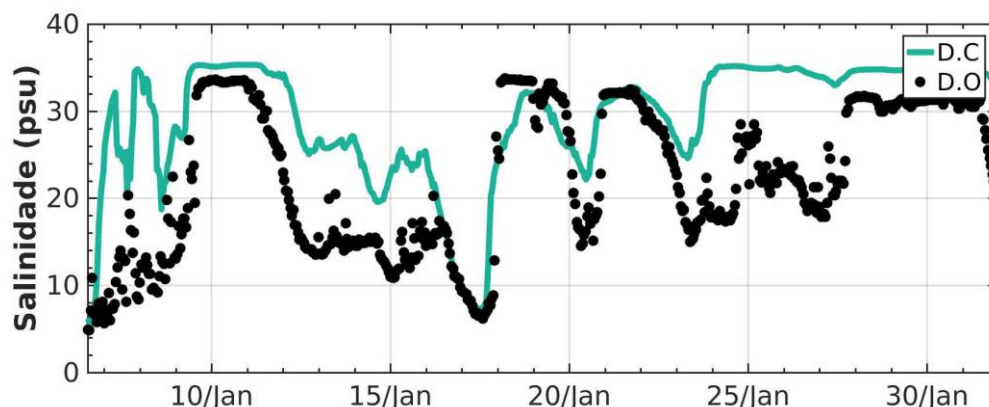


Figura 4 – Salinidade. Em preto são representados os dados (D.O) e em verde são apresentados os dados calculados pelo modelo (D.C).



A comparação entre as séries temporais de velocidade de corrente calculada e observadas em campo indicam que o modelo pode reproduzir as tendências do sinal de velocidade no canal da Lagoa de Patos. As principais diferenças analisadas de forma qualitativa, conforme apresentado na Figura 3, aparecem no período de 12 a 14 de Janeiro os dados estão subestimados e no período de 17 a 22 de Janeiro os dados calculados estão levemente superestimado com relação aos dados observados. Da mesma forma, a comparação entre as séries temporais de salinidade calculada e observada, conforme apresentado na Figura 4, as principais diferenças aparecem no período de 05 a 10 Janeiro, 13 a 16 Janeiro e de 24 a 27 de Janeiro, onde os dados calculados estão superestimados com relação aos dados observados.

As principais diferenças de superestimação nas séries temporais aparecem simultaneamente quase nos mesmos períodos. De acordo com Marques (2017)

a superestimação das séries temporais calculadas pode estar relacionada ao uso de um coeficiente de influência espacial constante do vento, ausência de ondas geradas pelo vento na hidrodinâmica ou devido ao uso de conjuntos de dados de baixa resolução espaço-temporal.

Para quantificar as superestimações das séries temporais calculadas e observadas foram utilizados indicadores de performance, como em Teegavarapu (2012), Marques (2017) e Oleinik (2017). Os indicadores de performance utilizados foram a raiz do erro quadrático médio (RMSE) e o erro médio absoluto (MAE).

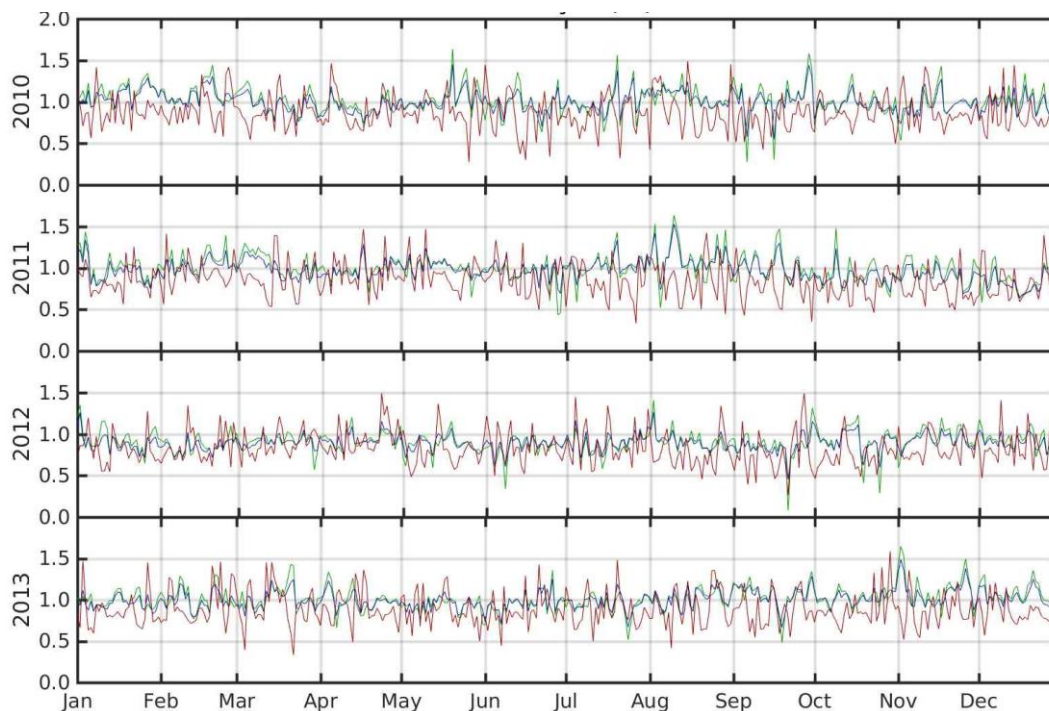
O RMSE associado a velocidade de corrente é de $0,21 \text{ m s}^{-1}$, por outro lado, a salinidade calculada apresentou um RMSE inferior a 8. O MAE encontrado para a velocidade é $0,173 \text{ ms}^{-1}$ e a salinidade apresentou um MAE inferior a 6 na região de estudo.

A verificação indica que apesar das limitações nos dados utilizados, para forçar e verificar o modelo numérico, a série temporal de velocidade de corrente e salinidade calculada, representa as tendências dos sinais medidos no canal estuarino da Lagoa dos Patos, assim como os resultados obtidos por Marques (2012), Marques (2017) e Li (2011).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 5 mostra séries temporais de elevação calculadas pelo modelo TELEMAC-3D, para três pontos distintos. A posição destes pontos são apresentados na Figura 2. O Ponto 1 está posicionado no interior do Saco da Mangueira, o Ponto 2 na saída do canal de acesso no baixo estuário da Lagoa dos Patos próximo da cidade de Rio Grande e o Ponto 3 na saída dos Molhes da Barra.

Figura 5 – Séries Temporais de Elevação. O Ponto 1 (interior do Saco da Mangueira) é representado pela cor verde, o Ponto 2 (baixo estuário) é representado pela cor azul e o Ponto 3 (saída dos Molhes da Barra) é representado pela cor vermelha.



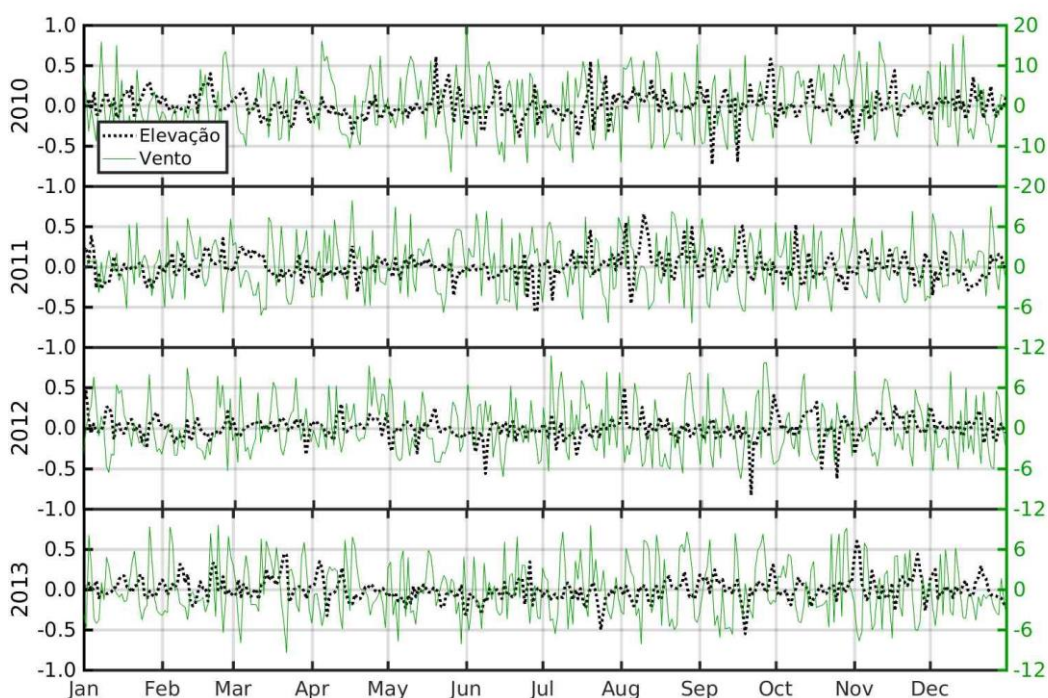
O padrão de circulação (set-up/set-down) descrito por Möller (1996), Möller (2001) e Fernandes (2002), pode ser observado na Figura 4, onde a elevação nos Pontos 1 e 2 são superiores a elevação no Ponto 3, ocorrendo condição de vazante na região, ou seja, o fluxo de água está saindo da Lagoa dos Patos em direção ao Oceano Atlântico, o inverso ocorre quando a elevação do Ponto 3 é superior a elevação nos Pontos 1 e 2. As séries temporais extraídas no Ponto 1 e 2 demonstram uma forte relação entre a elevação na enseada (Ponto 1 no interior do Saco da Mangueira) e a elevação no estuário e esta relação também foi observada por Monteiro (2006).

A hidrodinâmica do baixo estuário da Lagoa dos Patos é controlada pelo vento não-local (MÖLLER, 1996; MÖLLER, 2001; FERNANDES, 2002), a ação desta forçante têm efeito direto sobre a hidrodinâmica do Saco da Mangueira. Porém, para períodos com ventos de baixa intensidade, a ação da tensão de cisalhamento do vento sobre a Lagoa dos Patos (efeito local do vento) pode tornar-se importante dentro do estuário (MONTEIRO, 2006).

O efeito local do vento pode ser observado na Figura 6, onde foi plotado uma série temporal da componente longitudinal do vento e uma série temporal

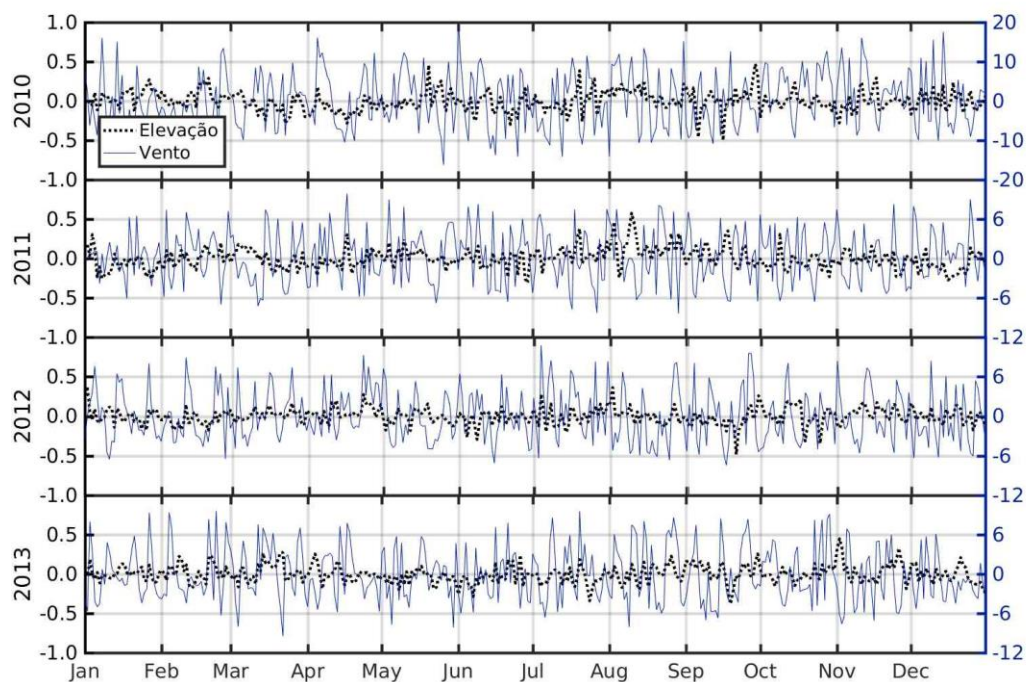
de elevação do nível médio da água para o Ponto 1 (interior do Saco da Mangueira). Para ventos soprando de sudoeste (valores positivos) ocorre redução da elevação dentro da enseada (Ponto 1 no interior do Saco da Mangueira) e para os ventos de nordeste (valores negativos) resulta no efeito inverso, ocorre um aumento na elevação, os mesmos resultados foram observados por Monteiro (2006).

Figura 6 – Série temporal de elevação e série temporal de vento longitudinal. A série temporal de elevação no Ponto 1 é representado pelos pontos pretos e a série temporal de vento longitudinal é representado pela cor verde.



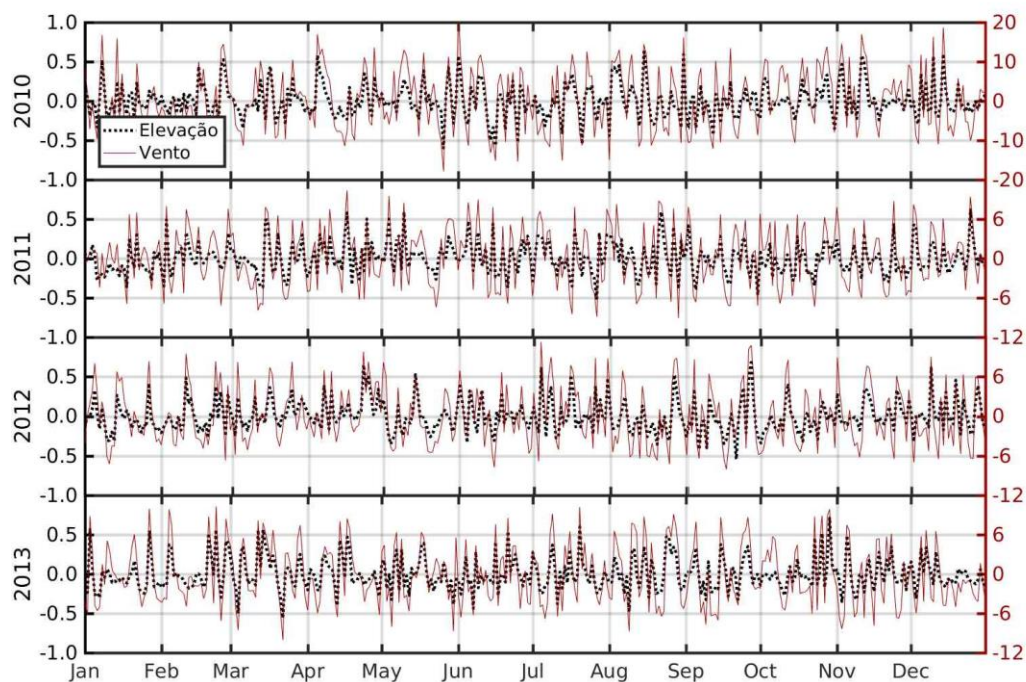
A Figura 7 mostra a variação na elevação (série temporal da componente longitudinal do vento e uma série temporal de elevação do nível médio da água), para o Ponto 2 (baixo estuário) e os resultados são os mesmos encontrados para o Ponto 1 (interior do Saco da Mangueira). Este resultado demonstra que o Ponto 1 e o Ponto 2 possuem a mesma relação hidrodinâmica, também observada por Monteiro (2006), onde a resposta do Saco da Mangueira a ação do vento local é instantânea.

Figura 7 – Série temporal de elevação e série temporal de vento longitudinal. A série temporal de elevação no Ponto 2 é representado pelos pontos pretos e a série temporal de vento longitudinal é representado pela cor azul.



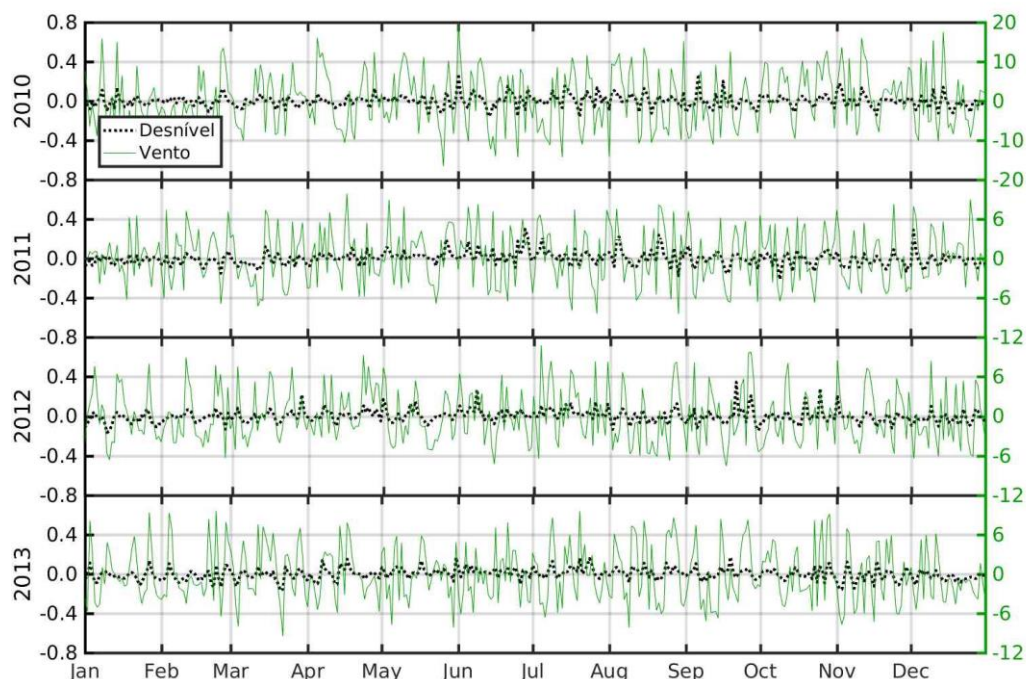
A Figura 8 mostra a variação na elevação, para o Ponto 3 (saída dos Molhes da Barra). Para ventos soprando de sudoeste (valores positivos) ocorre elevação do nível dentro do estuário e para os ventos de nordeste (valores negativos) ocorre uma diminuição na elevação.

Figura 8 – Série temporal de elevação e série temporal de vento longitudinal. A série temporal de elevação no Ponto 3 é representado pelos pontos pretos e a série temporal de vento longitudinal é representado pela cor vermelho.



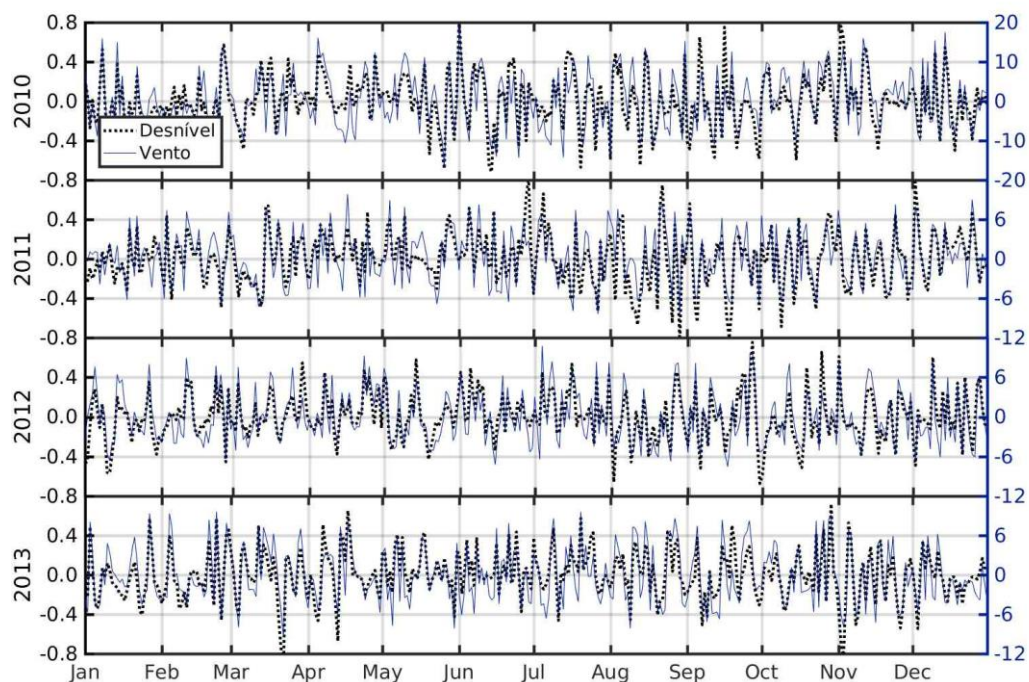
A Figura 9 mostra o desnível calculado entre o Ponto 1 (interior do Saco da Mangueira) e o Ponto 2 (baixo estuário). Os resultados demonstram que a componente longitudinal do vento em sua ação local sobre a superfície da água no interior do Saco da Mangueira causa um desnível entre os Pontos 1 e 2. Os ventos de sudoeste (valores positivos) geram um gradiente de pressão impulsionando o fluxo de água em direção ao baixo estuário. Para ventos de nordeste ocorre a condição inversa e contribui com a entrada de água na enseada do Saco da Mangueira, a mesma condição para este evento foi encontrada por Monteiro (2006).

Figura 9 – Série temporal de desnível e série temporal de vento longitudinal. Série temporal de desnível é representada pelos pontos pretos e a série temporal de vento longitudinal é representada pela cor verde.



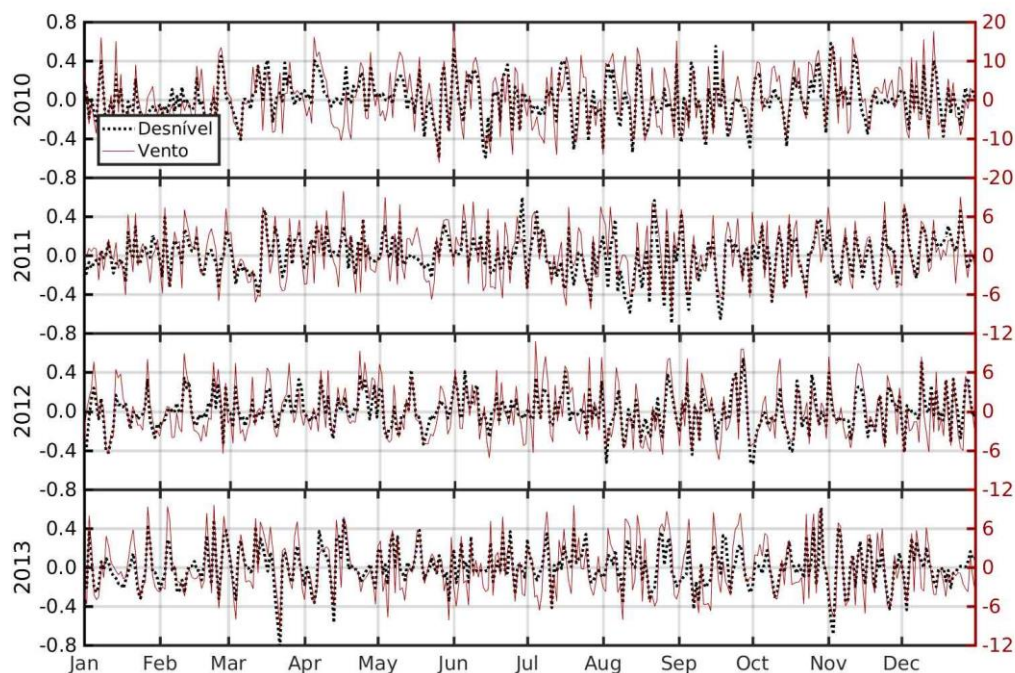
A Figura 10 mostra o desnível calculado entre o Ponto 1 (interior do Saco da Mangueira) e o Ponto 3 (Molhes da Barra). Os resultados demonstram que a componente longitudinal do vento em sua ação local sobre a superfície da água no interior do estuário causa um desnível em maior escala, com relação ao resultado anterior (desnível entre o Ponto 1 e 2). Os ventos de sudoeste (valores positivos) geram um gradiente de pressão impulsionando o fluxo de água em direção ao estuário (entrando no Molhes da Barra em direção ao estuário), como consequência deste evento o fluxo de água será introduzido no estuário e por sua vez no interior do Saco da Mangueira (devido a relação hidrodinâmica entre o Saco da Mangueira e o estuário). Para ventos de nordeste ocorre a condição inversa gerando um gradiente de pressão em direção a saída dos Molhes da Barra contribuindo para a saída do o fluxo de água em direção ao Oceano Atlântico.

Figura 10 – Série temporal de desnível e série temporal de vento longitudinal. Série temporal de desnível é representada pelos pontos pretos e a série temporal de vento longitudinal é representada pela cor azul.



A Figura 11 mostra o desnível calculado entre o Ponto 2 (baixo estuário) e o Ponto 3 (Molhes da Barra). Os resultados demonstram que a componente longitudinal do vento em sua ação local sobre a superfície da água no interior do estuário causa um desnível entre os Pontos 1 e 3. Os ventos de sudoeste (valores positivos) geram um gradiente de pressão impulsionando o fluxo de água em direção ao estuário (entrando no Molhes da Barra em direção ao estuário), assim o fluxo de água será introduzido no estuário. Devido a relação hidrodinâmica entre o Ponto 1 e 2, a água será introduzida no Saco da Mangueira. Para ventos de nordeste ocorre a condição inversa (saída de água do estuário em direção ao Oceano Atlântico).

Figura 11 – Série temporal de desnível e série temporal de vento longitudinal. Série temporal de desnível é representada pelos pontos pretos e a série temporal de vento longitudinal é representada pela cor vermelho.



4.1 Análise da Salinidade

A Figura 12 apresenta os campos médios de salinidade na camada superior (Figura 12a) e inferior (Figura 12b). Os resultados mostram pouca entrada de sal no estuário, como a hidrodinâmica do estuário afeta diretamente a enseada, está condição restringe a entrada de sal no Saco da Mangueira. A restrita entrada de sal na enseada está relacionada ao resultado obtido da Figura 4, onde durante o período simulado ocorre com maior frequência condições de vazante, ou seja, a saída de água do estuário. Resultados semelhantes nos padrões de salinidade foram observados por Möller (2001), Marques (2009), Marques (2010), Marques (2011) e Marques (2014).

Figura 12 – Salinidade média na região estuarina. (a) Salinidade média na camada superior e (b) Salinidade média na camada inferior.



A circulação salina na região de estudo é impulsionada por ventos de Sudoeste, que promovem condições de enchente no estuário, quando o efeito de vento não-local empilha a água em direção à planície costeira, força o fluxo de água salgada para o sul, devido a um gradiente de pressão barotrópico (MÖLLER, 1996; MÖLLER, 2001; MONTEIRO, 2006). Este mesmo vento gera um fluxo para o canal principal, devido ao efeito vento local, acumulando água na entrada da enseada, assim ventos mais fracos podem reverter o gradiente de pressão barotrópico favorecendo a entrada de água salgada no Saco da Mangueira (MONTEIRO, 2006).

A escala dos transectos das Figuras 13 e 14 foram ajustadas para representarem a variação de salinidade na região do canal que liga o Saco da Mangueira ao estuário da Lagoa dos Patos e a posição dos transectos são apresentadas na Figura 1. A Figura 13 mostra o transecto vertical próximo a enseada do Saco da Mangueira, contendo concentração de salinidade entre 12 e 14 psu, com as maiores concentrações de sal localizadas fundo. A massa específica da água salgada é consideravelmente maior que água doce, assim as maiores salinidades ocorrem no fundo da enseada.

Figura 13 – Salinidade média na seção transversal.

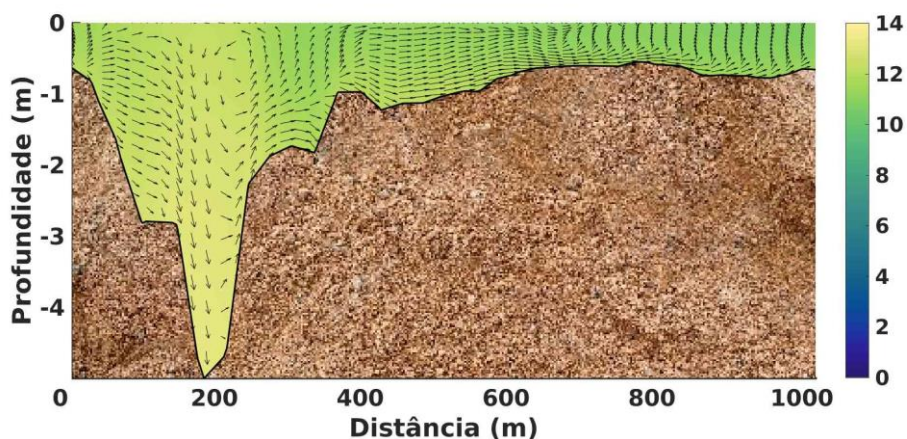
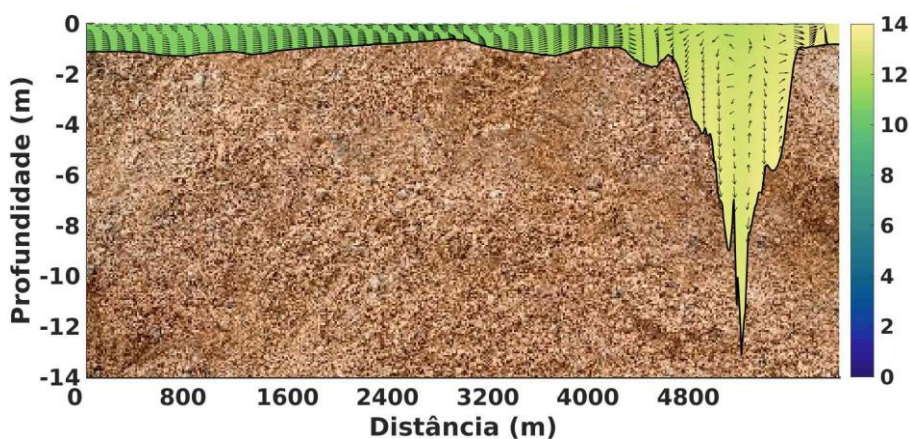


Figura 14 – Salinidade média na seção longitudinal.



A Figura 14 mostra o transecto longitudinal que passa pela enseada, atravessando o interior da Ponte dos Franceses, onde a concentração de salinidade está entre 12 e 14 psu. Os vetores com as direções das correntes indicam a saída das correntes para o estuário.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O comportamento hidrodinâmico foi investigado numericamente utilizando o modelo TELEMAC-3D. A elaboração de séries temporais de elevação, desnível e a análise do gradiente de pressão foram avaliadas para três pontos distintos, com a finalidade de compreender a circulação do fluxo de água na região.

As principais conclusões deste trabalho são:

- A dinâmica do Saco da Mangueira está relacionada a dinâmica do estuário, que é controlada pelo efeito não-local do vento.
- Para o Ponto 1 (interior do Saco da Mangueira) os ventos soprando de sudoeste (valores positivos) ocorre redução da elevação dentro da enseada e para os ventos de nordeste (valores negativos) resulta no efeito inverso, ocorre um aumento na elevação.
- Para o Ponto 2 (baixo estuário) os resultados são os mesmos encontrados para o Ponto 1 (interior do Saco da Mangueira), pois o vento atuando sobre a superfície da água efeito local causa um transporte de água instantâneo entre o Ponto 1 e Ponto 2 que estão muito próximos.
- Para o Ponto 3 (Molhes da Barra) os ventos soprando de sudoeste (valores positivos) ocorre elevação do nível dentro do estuário e para os ventos de nordeste (valores negativos) ocorre um diminuição na elevação.
- Os desníveis e os gradientes de pressão entre os pontos proporcionam a direção do fluxo de água. Quando os ventos são de sudoeste (valores positivos) o fluxo de água salgada é introduzido dentro do Saco da Mangueira.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão das bolsas de estudo, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo contrato 304227/2016-1, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) pelo contrato 17/2551-0001 159-7 e ao Centro Nacional de Supercomputação (CESUP), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), que auxiliaram o desenvolvimento deste trabalho. Agradecem também ao ECMWF pelos dados meteorológicos, ao HYCOM pelos dados oceanográficos, e à ANA pelos fluviais utilizados nas condições de contorno do modelo, ao consórcio Open TELEMACMASCARET por disponibilizar o sistema TELEMAC gratuitamente e ao Laboratório Nacional de Computação Científica (LNCC) pela disponibilização de uso do Supercomputador Santos Dumont.

REFERÊNCIAS

BARROS, G.; MARQUES, W.; KIRINUS, E. Influence of the freshwater discharge on the hydrodynamics of patos lagoon, brazil. *International Journal of Geosciences*, Citeseer, v. 5, n. 09, p. 925, 2014.

BAUMGARTEN, M.; NIENCHESKI, L.; VEECK, L. Nutrientes na coluna da água e na água intersticial de sedimentos de uma enseada rasa estuarina com aportes de origem antrópica. *Atlântica*, v. 23, p. 101–116, 2001.

CALLIARI, L. et al. Fine grain sediment transport and deposition in the Patos Lagoon-Cassino beach sedimentary system. *Continental Shelf Research*, Elsevier B.V., v. 29, p. 515–529, 2009.

CASTELÃO, R.; JUNIOR, O. M. Sobre a circulação tridimensional forçada por ventos na lagoa dos patos. 2003.

COSTI, J. et al. Water level variability of the mirim-são gonçalo system, a large, subtropical, semi-enclosed coastal complex. *Advances in Water Resources*, Elsevier, v. 117, p. 75–86, 2018.

FERNANDES, E.; DYER, K.; MÖLLER, O. Spatial Gradients in the Flow of Southern Patos Lagoon. *Journal of Coastal Research*, v. 21, n. 4, p. 759–769, 2005.

FERNANDES, E. et al. The patos lagoon hydrodynamics during an el nino event (1998). *Continental Shelf Research*, Elsevier, v. 22, n. 11-13, p. 1699–1713, 2002.

HARTMANN, C.; SCHETTINI, C. A. F. Aspectos Hidrológicos na Desembocadura Laguna dos Patos-RS. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 21, p. 373–382, 1991.

HERVOUET, J. M. *Hydrodynamics of free surface flows. Modelling with the finite element method*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007. 341 p.

JANEIRO, J. et al. Wind and freshwater influence over hydrocarbon dispersal on Patos Lagoon, Brazil. *Marine Pollution Bulletin*, v. 56, n. 4, p. 650–665, 2008.

KIRINUS, E. de P. et al. Long-term simulations for ocean energy off the brazilian coast. *Energy*, Elsevier, v. 163, p. 364–382, 2018.

LI, J.; HEAP, A. D. A review of comparative studies of spatial interpolation methods in environmental sciences: performance and impact factors. *Ecological Informatics*, Elsevier, v. 6, n. 3-4, p. 228–241, 2011.

MARQUES, W. C. *Padrões de variabilidade temporal nas forçantes da circulação e seus efeitos na dinâmica da Lagoa dos Patos, Rio Grande do Sul, Brasil*. Dissertação (Mestrado), 2005.

Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão. Paranaguá, PR, v.4, n.2, abril de 2019.

MARQUES, W. C. *Estudo da Dinâmica da Pluma Costeira da Lagoa dos Patos*. 284 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande, 2009.

MARQUES, W. C. et al. Dynamics of the Patos Lagoon coastal plume and its contribution to the deposition pattern of the southern Brazilian inner shelf. *Journal of Geophysical Research*, 2010.

MARQUES, W. C.; FERNANDES, E. H. L.; ROCHA, L. A. O. Straining and advection contributions to the mixing process in the Patos Lagoon estuary, Brazil. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 116, n. 3, p. 1–23, 2011. ISSN 21699291.

MARQUES, W. C. et al. Energy converting structures in the southern Brazilian shelf: Energy conversion and its influence on the hydrodynamic and morphodynamic processes. 2011.

MARQUES, W. C.; JUNIOR, O. O. M. Variabilidade temporal em longo período da descarga fluvial e níveis de água da lagoa dos patos, rio grande do sul, brasil. 2008.

MARQUES, W. C.; MÖLLER, O. Variabilidade temporal em longo período da descarga fluvial e níveis de água da Lagoa dos Patos. *Revista Brasileira de Recursos*, Rio Grande do Sul, Brasil, p. 155–163, 2009.

MARQUES, W. C.; STRINGARI, C. E.; EIDT, R. T. The Exchange Processes of the Patos Lagoon Estuary – Brazil: A Typical El Niño Year versus a Normal Meteorological Conditions Year. *Advances in Water Resource and Protection*, v. 2, p. 11–20, 2014.

MARQUES, W. C. et al. Numerical modeling of the Tramandaí beach oil spill, Brazil—Case study for January 2012 event. *Applied Ocean Research*, Elsevier B.V., v. 65, p. 178–191, 2017.

MÖLLER, O. O. *Hydrodynamique de la Lagune dos Patos (30°S, Brésil)*. 204 pp p. Tese (Mesures et modélisation.) — Universidade de Bordeaux, França, 1996.

MÖLLER, O. O. et al. The influence of local and non-local forcing effects on the subtidal circulation of Patos Lagoon. *Estuaries*, v. 24, p. 297–311, 2001.

MONTEIRO, I. et al. Hidrodinâmica do Saco da Mangueira: mecanismos que controlam as trocas com o estuário da Lagoa dos Patos. *Atlântica*, v. 27, n. 2, p. 8–101, 2006.

OLEINIK, P.; MARQUES, W.; KIRINUS, E. Evaluation of the Seasonal Pattern of Wind-Driven Waves on the South-Southeastern Brazilian Shelf. *Defect and Diffusion Forum*, v. 370, p. 141–151, 2017.

PARISE, C. K.; CALLIARI, L. J.; KRUSCHE, N. Extreme storm surges in the south of brazil: atmospheric conditions and shore erosion. *Brazilian Journal of Oceanography*, SciELO Brasil, v. 57, n. 3, p. 175–188, 2009.

PEREIRA, A. *Simulação numérica da circulação do saco da mangueira (estuário da lagoa dos patos), utilizando o método de elementos finitos*: Furg. Monografia de conclusão do curso de oceanologia, 1997.

TEEGAVARAPU, R. *Floods in a changing climate: extreme precipitation*. [S.l.]: Cambridge University, 2012.

Edição especial - 8º MCSul - Conferência Sul em Modelagem Computacional e VIII SEMENGO - Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica.

Enviado em: 04 fev. 2019

Aceito em: 07 fev. 2019

Editores responsáveis: João Paulo Silva Lima / Liércio André Isoldi / Mateus das Neves Gomes