

3 – Resultados experimentais e implementação e validação do modelo

3.1 – Propriedades hidrográficas

Perfis das propriedades hidrográficas

Os perfis de velocidade longitudinal horários (Fig. 3.1) correspondentes à maré de quadratura (azul), observados durante dois ciclos completos de maré, indicam claramente a assimetria nas correntes estuário abaixo $u > 0$ e acima $u < 0$, contendo valores de velocidade entre os máximos de vazante e enchente na superfície iguais a 0,9 m/s e -0,3 m/s, respectivamente (Miranda et al., 2005; Miranda et al. 2006). Essa assimetria foi forçada pelo elevado índice pluviométrico que ocorreu durante esse experimento, quando o estuário foi classificado como tipo 2b, ou seja, parcialmente misturado com circulação gravitacional bidirecional, que também pode ser identificada em perfis horários.

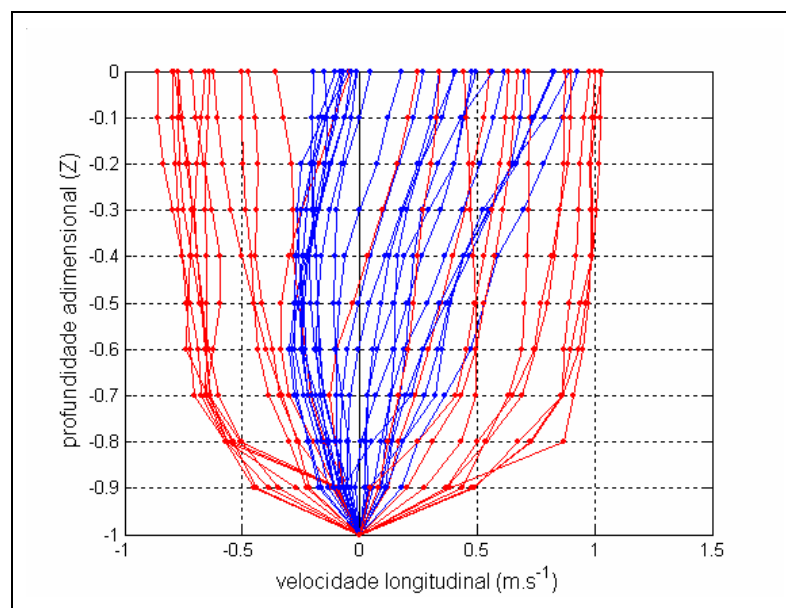


Figura 3.1 – Variação temporal horária dos perfis de velocidade ($m.s^{-1}$) durante dois ciclos completos de maré semidiurna (25 h): quadratura e sizígia em azul e vermelho respectivamente. Valores de $u < 0$ e $u > 0$ indicam velocidades estuário acima e abaixo, adaptado de: Miranda et al., 2005.

Durante a maré de sizígia (vermelho), ocorreram condições menos assimétricas entre as correntes enchente e de vazante e a classificação do estuário evoluiu para o tipo 2a, parcialmente misturado e com fraca estratificação vertical. O cisalhamento vertical de velocidade foi mais acentuado nas proximidades do fundo e na extrapolação da velocidade foi adotada a condição de atrito máximo no fundo (não escorregamento) tendo em vista a condição de contorno imposta no modelo analítico utilizado para a simulação teórica desses perfis (Miranda et al., 2005). Os valores de velocidade na maré de sizígia na superfície variaram entre 1,08 m/s e -0,75 m/s, para as marés vazante e enchente, respectivamente (Fig. 3.1).

Nos perfis verticais das médias temporais do componente longitudinal de velocidade (Fig. 3.2) representadas por $\langle u(Z) \rangle$ e U_s (descontado o efeito da velocidade gerada pela descarga fluvial, $u_f = Q_f/A \approx u_a$), observou-se que durante a maré de quadratura (azul), foram observados valores relativamente altos próximos à superfície, quando comparados ao perfil correspondente de sizígia.

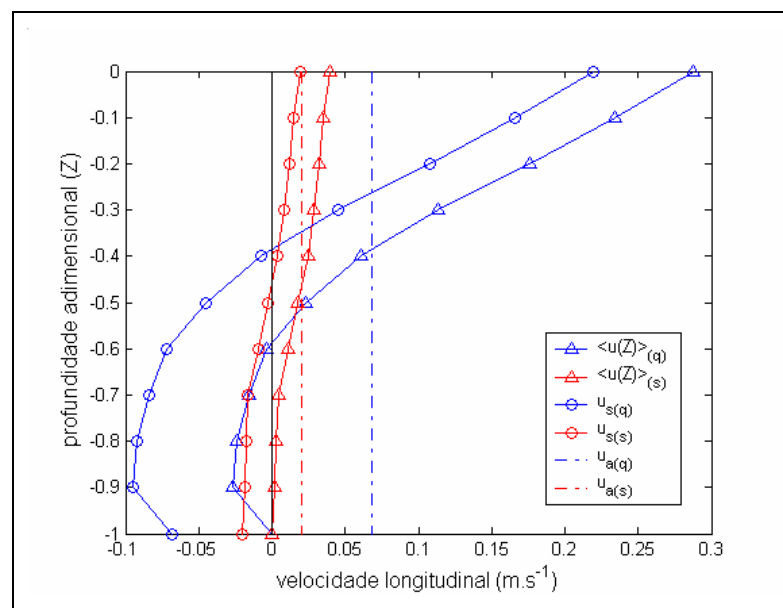


Figura 3.2 – Perfis médios de velocidade ($m \cdot s^{-1}$) obtidos a partir da integração de perfis horários durante dois ciclos completos de maré semidiurna (25 h): quadratura com subscrito (q) e sizígia com subscrito (s). Valores de $u < 0$ e $u > 0$ indicam velocidades estuário acima e abaixo, adaptado de: Miranda et al., 2005.

Nessa figura (Fig. 3.2) também se observa que os perfis de $u_{s(s)}$, $u_{s(q)}$ e $\langle u(Z) \rangle_{(q)}$, apresentam o comportamento típico da circulação gravitacional, com movimentos bidirecionais (estuário abaixo e acima nas camadas superior e de fundo, respectivamente, devido à forçante de natureza baroclínica. Na maré de sizígia o perfil $u_{s(s)}$ apresenta velocidades muito pequenas, quando comparadas à condição de quadratura ($u_{s(q)}$), apresentando também um padrão de circulação gravitacional típico de estuários parcialmente misturados em condições normais. A componente u_a gerada pela descarga do rio é máxima na quadratura com 0,068 m/s e menor na maré de sizígia 0,020 m/s.

A variação horária dos perfis verticais de salinidade (Fig. 3.3) na maré de quadratura apresentam haloclinas com acentuado gradiente vertical, enquanto que na sizígia esses perfis exibem condição bem misturada; observa-se também a intensificação e erosão cíclica da haloclina devido aos processos de difusão turbulenta e advectivo gerados pela a maré, oscilando assim entre perfis com alta e baixa estratificação vertical. Para os perfis relacionados à maré de sizígia temos uma homogeneidade da salinidade na coluna de água devido ao processo de mistura mais intenso do que os observados na maré de quadratura. Os valores de máxima e mínima salinidades para a maré de quadratura são de 28,2 e 20,2 para a superfície e de 27,9 e 36,3 para o fundo, indicando assim a intrusão massa de Água Tropical AT. Já os perfis de salinidade na sizígia estão compreendidos entres os valores de $\approx 29,0$ e $\approx 36,7$ com o predomínio da massa de água AT durante a maré enchente.

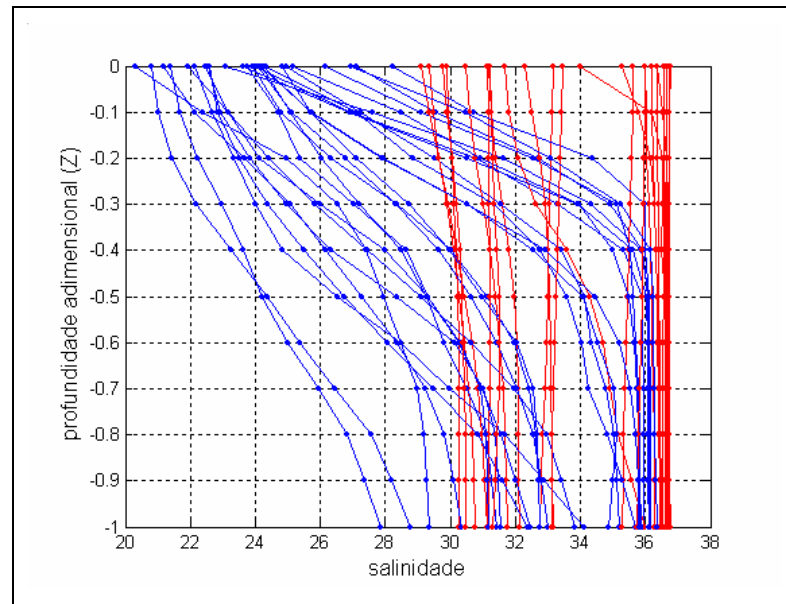


Figura 3.3 – Variação temporal horária dos perfis de salinidade durante dois ciclos de maré semidiurna (25 h): quadratura e sizígia em azul e vermelho respectivamente, adaptado de: Miranda et al., 2005.

As médias temporais da salinidade para os dois ciclos de maré, representando condições quase-estacionárias nas condições de quadratura e de sizígia, são apresentadas na figura 3.4. Na quadratura observa-se uma variação de de aproximadamente 10 unidades, no intervalo de 23,6 até 33,5. Na maré de sizígia a variação da salinidade entre superfície é inferior a uma unidade (de $\approx 34,0$ a $\approx 34,3$), refletindo as condições quase homogêneas observadas nos perfis horários (Fig. 3.3).

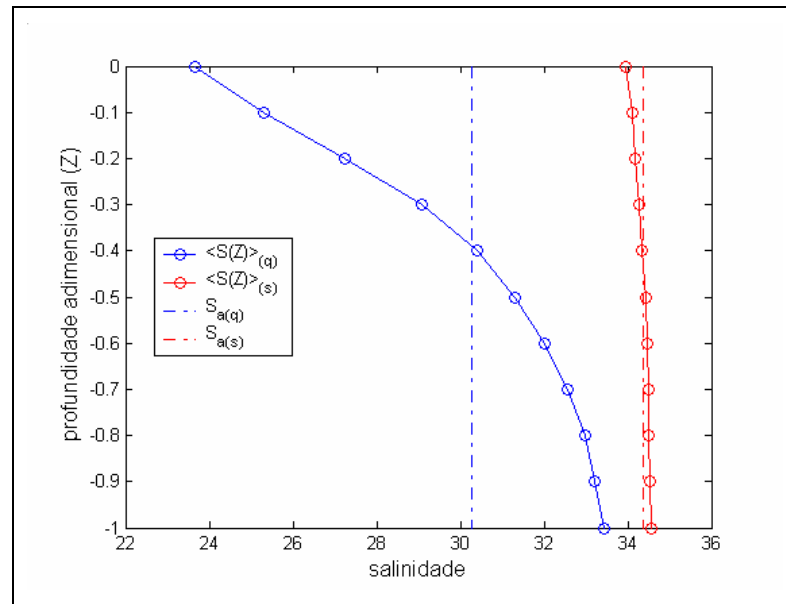


Figura 3.4 – Perfis quase-estacionários de salinidade obtidos a partir da integração de perfis horários durante dois ciclos de maré semidiurna (25 h): quadratura com subscrito (q) e sizígia com subscrito (s), adaptado de Miranda et al., 2005.

Diagramas de mistura e estratificação-circulação

O diagrama de mistura ou diagrama T-S é utilizado na oceanografia física estuarina para identificar fontes de massas de água para a formação das massas de água estuarina. Como exemplo, podem-se citar os trabalhos de Schettini et al. (1998) e Miranda et al. (2002) que aplicaram esse diagrama para estudar a formação das massas de água do estuário do rio Itajaí e do canal estuarino de Bertioga, respectivamente. Para o estuário em estudo, o diagrama de mistura (Fig. 3.5) apresenta a variação das propriedades termohalinas observadas durante os experimentos de quadratura e de sizígia na estação fixa (estação 3), indicando variações nos seguintes intervalos: $\approx 27,0^{\circ}\text{C} < T < \approx 28,8^{\circ}\text{C}$; $\approx 28,8 < S < \approx 36,7$ e $\approx 26,8^{\circ}\text{C} < T < \approx 28,6^{\circ}\text{C}$; $\approx 20,0 < S < \approx 36,5$ e a densidade, representada no diagrama por uma família paramétrica de curvas isopicnais (em unidades de Sigma-t), variou de $17,5 < S < 23,5$ e $11,5 < S < 23,5$, respectivamente. Devido à quase isotermia da massa de água estuarina e a profundidade relativamente pequena do estuário, a densidade passa a ser uma função somente da salinidade. Logo, a condição inicial do modelo

numérico no modo baroclínico será bem representada por um campo de temperatura isotérmico com a densidade variando somente em função da salinidade.

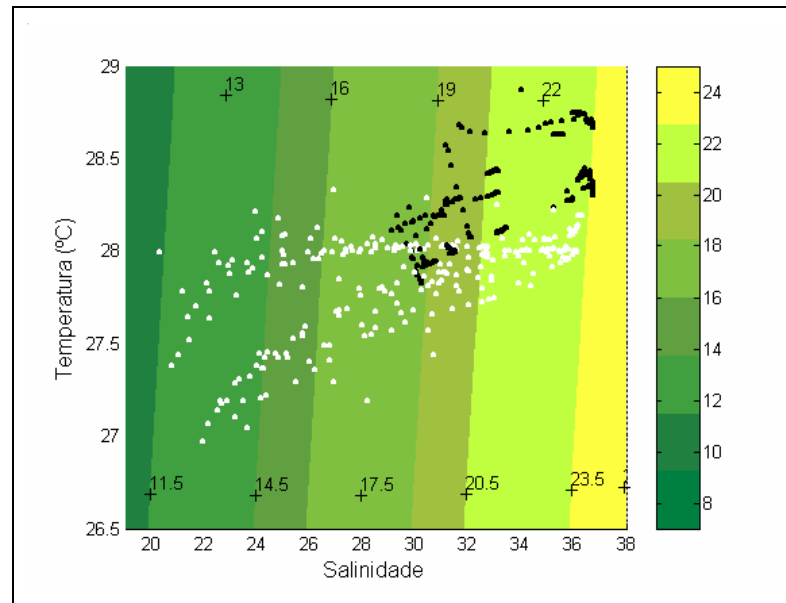


Figura 3.5 – Diagrama TS espalhado no estuário Curimataú obtido a partir da coleta de perfis horários durante dois ciclos de maré semidiurna 25 h (quadratura e sizígia em branco e preto respectivamente).

Devido ao fato de que a descarga fluvial ($S \approx 0$) é um ingrediente importante para a formação das massas de água estuarinas, as curvas T-S que podemos inferir da distribuição de pontos sobre o diagrama (Fig. 3.5) apresentam a configuração geral ascendente cruzando obliquamente as isopícnos, indicando que a diluição da água do mar pela água da descarga fluvial ocorre principalmente por processos de mistura (advecção e difusão turbulenta) não isopícnal. No extremo superior do espalhamento dos pares (T,S), os valores de salinidade maiores do que 36,0 ($S > 36,0$) indicam que a massa de Água Tropical (AT) também é um dos ingredientes para a formação da massa de água estuarina.

O diagrama Estratificação circulação foi deduzido analiticamente com um modelo bidimensional estacionário, lateralmente homogêneo e com seção retangular que simula perfis teóricos da velocidade longitudinal e da salinidade (Hansen & Rattray, 1965; 1966). Esse modelo resolve analiticamente um sistema composto das equações do movimento, da continuidade, da conservação de sal e a equação de estado da água do mar linear, no plano Oxz. Com base nos perfis

teóricos de $u=u(z)$ e $S=S(z)$ que se compõem dos modos baroclínico, da descarga fluvial e da tensão de cisalhamento do vento, é possível o cálculo teórico dos parâmetros estratificação e circulação definidos da seguinte forma: o parâmetro estratificação ($pe=[(S_f - S_s)/\bar{S} = \delta S / \bar{S}$ (δS é a diferença entre as salinidades de fundo e de superfície e \bar{S} é a salinidade média na coluna de água) e o parâmetro circulação ($pc=u_s/u_f$), com u_s e u_f) denotando as velocidades médias na superfície e a gerada pela descarga fluvial.

O diagrama Estratificação-circulação tem um *parâmetro chave*, denotado por v , que é função dos parâmetros estratificação e circulação [$v=v(pe,pc)$], dada pela seguinte expressão (Miranda et al., 2002):

$$\left(\frac{\delta S}{\bar{S}}\right)^{-1} \left[210 + 252 \left(\frac{u_s}{u_f} - \frac{3}{2} \right) \right] v^2 + \left\{ 32 - \left(\frac{\delta S}{\bar{S}}\right)^{-1} \left[210 + 252 \left(\frac{u_s}{u_f} - \frac{3}{2} \right) \right] \right\} v + \left\{ 76 \left(\frac{u_s}{u_f} - \frac{3}{2} \right) + \frac{152}{3} \left(\frac{u_s}{u_f} - \frac{3}{2} \right)^2 \right\} v \quad (3.8)$$

Quando $v=1$ o transporte de sal estuário acima é inteiramente por difusão turbulenta e para $v \rightarrow 0$ a difusão turbulenta torna-se desprezível predominando o efeito advectivo. A equação (3.8) é do segundo grau e combinando esse resultado teórico com dados de estuários reais, para os quais foi possível simular perfis verticais quase-estacionários, foi estabelecido um critério analítico e quantitativo para a classificação de estuários nos seguintes tipos (Hansen & Rattray, 1966, Hamilton & Rattray, 1978) de interesse para a região em estudo:

- *Tipo 1:* quando $v \rightarrow 1$, o fluxo resultante é estuário abaixo em todas as profundidades e o transporte de sal é devido somente ao processo de difusão turbulenta (tipo bem misturado) e o efeito baroclínico para o transporte de sal estuário acima é desprezível.

- *Tipo 2a ou 2b:* quando $0 < v < 1$, o movimento resultante (circulação gravitacional) reverte com a profundidade (tipo parcialmente misturado) e o efeito

baroclínico e a difusão turbulenta são os processos responsáveis pelo transporte de sal para o interior do sistema.

Uma subdivisão do diagrama em $pe = \delta S / \bar{S} = 0,1$, levando em conta a estratificação vertical da coluna de água, subdivide os tipos acima descritos em:

- *Tipo a*: fracamente estratificado.
- *Tipo b*: altamente estratificado.

Esse critério de classificação foi aplicado ao estuário do rio Curimataú) Fig. 3.6). Dessa figura observa-se que no regime de maré de quadratura o estuário se apresenta como tipo 2b ($v=0,79$), indicando o efeito predominante da difusão da maré para o transporte de sal estuário acima. Na maré de sizígia, quase a totalidade do transporte de sal e devido ao efeito difusivo ($v=0,99$).

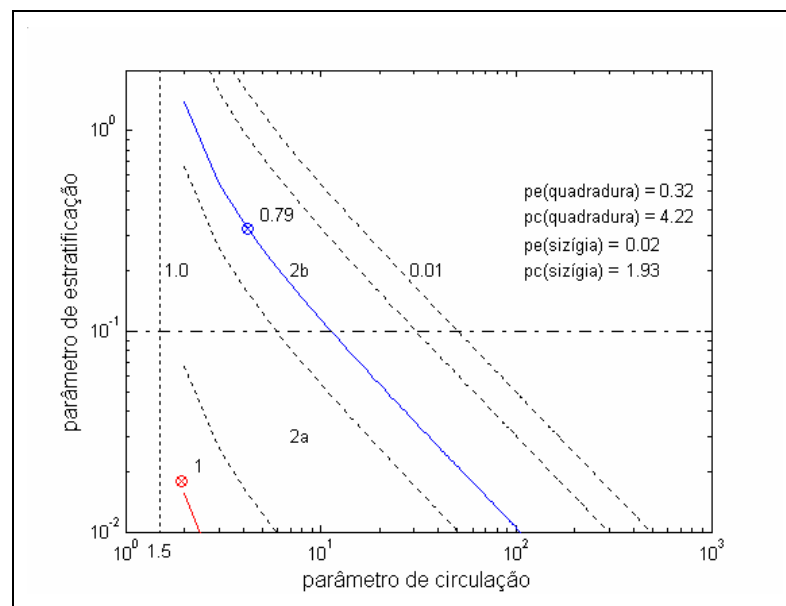


Figura 3.6 – Classificação do estuário do rio Curimataú (estação 3) nas condições de maré de quadratura (azul) e de sizígia (vermelho), adaptado de: Miranda et al., 2006.

Número de Richardson estuarino e por camada

O número de Richardson estuarino (R_{ie}), que estabelece a razão do ganho de energia potencial devido à descarga do rio e a energia cinética da maré (eq. 3.7) para desestabilizar verticalmente a coluna de água (Fisher, 1972), foi usado por Miranda et al. (2005) para analisar comparativamente a influência dessas forçantes sobre a dinâmica do estuário do rio Curimataú.

$$R_{ie} = \frac{g\Delta\rho_H \bar{h}u_a}{\rho u_{rmq}^3}, \quad (3.7)$$

Em que $\Delta\rho_H$ é a diferença entre a densidade entre a água do mar e a do rio, $\bar{h}u_a$ é a descarga fluvial por unidade de largura e u_{rmq} é a raiz média quadrática da velocidade gerada pelo efeito barotrópico da maré, aproximada por $u_{rmq} = \bar{u}(t) - u_a$ com $\bar{u}(t)$ denotando a velocidade média na coluna de água. Na maré de quadratura, $R_{ie} \approx 5,6$ e a dinâmica do estuário foi dominada pela descarga fluvial, enquanto que na maré de sizígia $R_{ie} \approx 0,1$ e a energia cinética da maré foi a principal forçante (Miranda et al. 2005).

O número de Richardson por camadas Ri_L (Bowden, 1978) tal como o R_{ie} , relaciona características globais das forçantes que estabilizam e desestabilizam verticalmente a coluna de água, mas a sua variação pode ser estudada durante o ciclo de maré (Eq. 3.8):

$$Ri_L = \frac{gh\Delta\rho_v}{\rho u^2} \approx \frac{gh\beta\Delta S_v}{u^2} \quad (3.8)$$

Onde $h = h(t)$ é a profundidade local, $\Delta\rho_v$ e ΔS_v a diferença entre a densidade (salinidade) do fundo e superfície, \bar{u} é o valor médio da velocidade na coluna e β é o coeficiente de contração salina. Os limites inferior e superior ($Ri_L = 2,0$ e $Ri_L = 20,0$) foram introduzidos por Dyer (1986) para estabelecer as condições de estabilidade da coluna de água.

Na figura (3.7) apresenta-se comparativamente a variação temporal do número Ri_L nos regimes de maré de quadratura com condições de estabilidade vertical (em geral $Ri_L > 2$), quando o estuário foi dominado pela descarga fluvial ($Ri_e \approx 5,6$), enquanto que no regime de sizígia $Ri_L < 2$, indicando condições de fraca estabilidade vertical, período em que o estuário foi forçado predominantemente pela maré ($Ri_e \approx 0,1$).

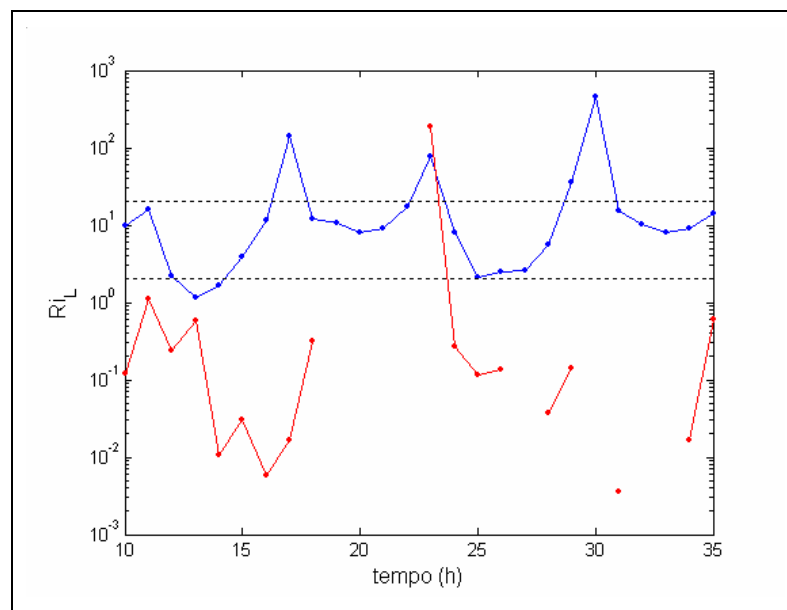


Figura 3.7 – Variação temporal do número de Richardson por camada durante dois ciclos de maré semidiurna (25 h): quadratura (azul) e sizígia (vermelho).

Transporte de sal

A corrente de maré, a circulação gravitacional e a descarga fluvial são responsáveis pelo transporte de sal em sentidos oposto: para o interior do estuário e para a região costeira adjacente. Entretanto, nos estuários parcialmente misturados, o transporte de sal estuário acima é predominantemente gerado pela circulação gravitacional e pela difusão da maré. Esse processo foi estudado analiticamente por vários pesquisadores considerando estuários lateralmente homogêneos (bidimensionais) e não homogêneos (Bowden, 1963; Fischer, 1976; Hunkins, 1981, dentre outros. Nesses trabalhos o transporte médio de sal (T_S) durante um ou mais ciclos completos de maré é separado em componentes que são geradas pelos

seguintes processos físicos: descarga fluvial (Φ_1), deriva de Stokes (Φ_2), difusão da maré (Φ_3), circulação gravitacional (Φ_4), difusão residual (Φ_5), cisalhamento da maré (Φ_6) e efeito não estacionário do vento (Φ_7). Os resultados de Hunkins (1981) foram adaptados por Miranda et al. (1998) para estuários lateralmente homogêneos (eq. 3.9), com T_S expresso em $M L^{-1}T^{-1}$:

$$T_S = \frac{1}{T} \int_0^T \left(\int_0^{h(t)} \rho u S dz \right) dT \approx \rho (u_a h_a S_a + \langle h_t u_t \rangle S_a + h_a \langle u_t S_t \rangle + h_a \overline{u_s S_s} + \langle u_t S_t h_t \rangle + \langle u_a S_t h_t \rangle) = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \Phi_4 + \Phi_5 + \Phi_6 + \Phi_7 \quad (3.9)$$

Esse resultado foi obtido com a decomposição do componente longitudinal da velocidade $u=u(x,z,t)$, da salinidade $S=S(x,z,t)$ e da espessura da coluna de água $h=h(t)$ em parcelas, separando os efeitos da descarga fluvial, das correntes de maré, da circulação gravitacional e de velocidades residuais não incluídas nessas forçantes da circulação estuarina.

Os resultados dessa decomposição, considerando apenas as quatro primeiras parcelas (Φ_1, Φ_2, Φ_3 e Φ_4), são apresentados na Tabela 3.1, de acordo com Miranda et al. (2005) e, nas figuras 3.7 e 3.8 os resultados recalculados neste trabalho para as condições de maré de sizígia e de quadratura, respectivamente.

Tabela 3.1 – Componentes principais do transporte advectivo de sal, por unidade de largura, em condições de maré de quadratura e de sizígia. Unidade em $kg\ m^{-1}s^{-1}$ (de acordo com Miranda et al., 2005).

Processo físico	Quadratura	Sizígia
Descarga fluvial (Φ_1)	7.30±1,10	3.30±0,10
Deriva de Stokes (Φ_2)	-0.70±0,09	-4.80±0,40
Difusão da mare (Φ_3)	1.00±0,03	-0.50±0,05
Gradiente Baroclínico (Φ_4)	-1.60±0,30	0,00
$\Sigma(\phi_1+\phi_2+\phi_3+\phi_4)$	6,00±0,70	-2.00±0,60

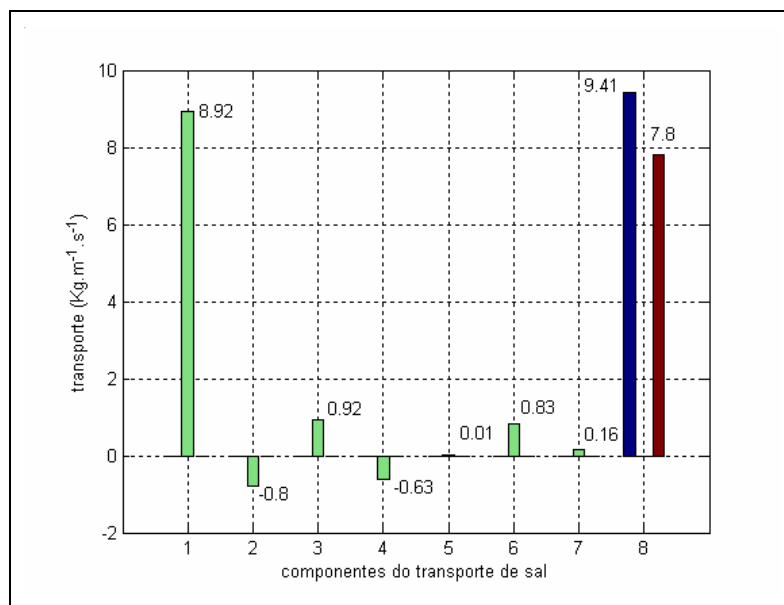


Figura 3.8 – Componentes do transporte de sal na maré de quadratura, onde: 1° descarga fluvial, 2° transporte de Stokes, 3° correlação de maré, 4° circulação gravitacional, 5° bombeamento da maré, 6° cisalhamento da maré, 7° flutuações do vento, 8° Ts (Ts = 1°+2°+3°+4°+5°+ 6° +7°) e 9° Ts resultante.

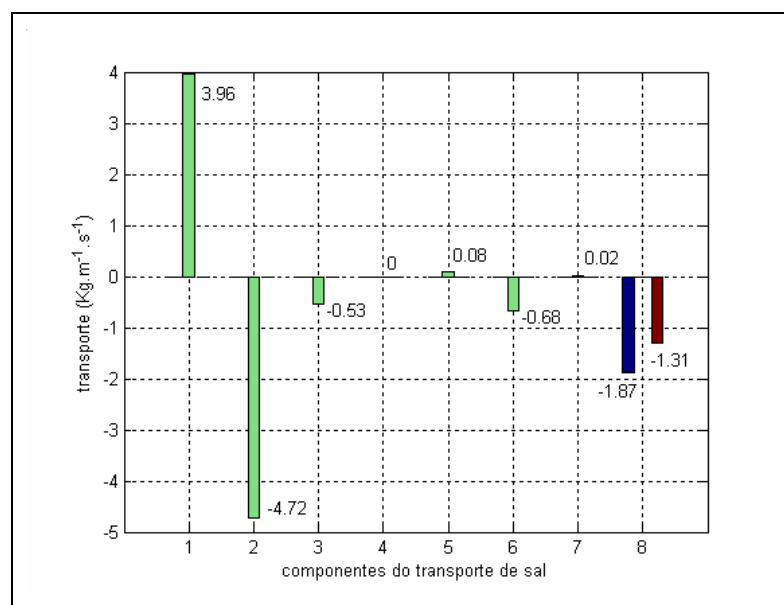


Figura 3.9 – Componentes do transporte de sal na maré de sizígia, onde: 1° descarga fluvial, 2° transporte de Stokes, 3° correlação de maré, 4° circulação gravitacional, 5° bombeamento da maré, 6° cisalhamento da maré, 7° flutuações do vento, 8° Ts (Ts = 1°+2°+3°+4°+5°+ 6° +7°) e 9° Ts resultante.

Os principais componentes do transporte advectivo e os transportes resultantes de acordo com Miranda et al. (2004) apresentados na Tabela 3.1 são concordantes com os resultados do reprocessamento (Figs. 3.8 e 3.9); o transporte de sal, por unidade de largura da seção, para os regimes de quadratura (Fig. 3.8) e quadratura (Fig. 3.9) é predominantemente forçado pela descarga fluvial e pelo efeito advectivo da deriva de Stokes, respectivamente.

Isopletas das propriedades hidrográficas

A variação local da salinidade e do componente longitudinal da velocidade foi analisada com base no método das isopletas. No experimento de quadratura (Fig. 3.10) observa-se a acentuada estratificação de salinidade na coluna de água nos eventos de estofas de baixa-mar, com a haloclina apresentando acentuado gradiente vertical de salinidade; nas estofas de preamar o gradiente vertical de salinidade é menor e a camada inferior a estrutura de sal apresenta-se homogênea com altos valores de salinidade ($S > 36,0$) indicando, de acordo com Miranda et al. (2005) a intrusão da massa de água AT no estuário. A estrutura de sal na maré de sizígia (Fig. 3.11) mostra condições quase verticalmente homogêneas no entorno da preamar ($S > 36,0$) enquanto que na baixa-mar desenvolve-se uma haloclina com pequeno gradiente vertical de salinidade; nesta condição de maré a intrusão da AT foi mais intensa do que no período de quadratura.

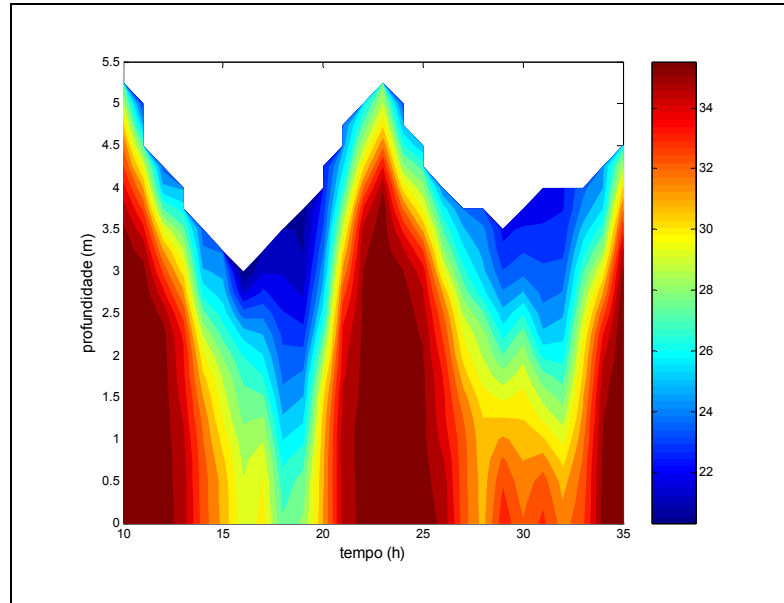


Figura 3.10 – Isopletas de salinidade durante dois ciclos semidiurnos (25 h) na maré de quadratura, adaptada de: Miranda et al, 2006. Os valores de salinidade são indicados na escala vertical.

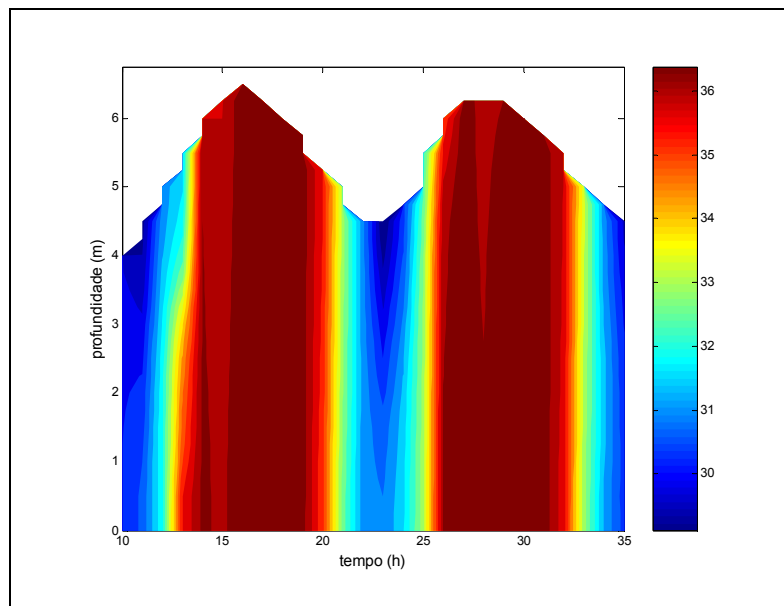


Figura 3.11 – Isopletas de salinidade durante dois ciclos semidiurnos (25 h) na maré de sizígia, adaptada de: Miranda et al, 2006. Os valores de salinidade são indicados na escala vertical.

As isopletas do componente longitudinal de velocidade para os ciclos de quadratura (Fig. 3.12) (quando o estuário foi predominantemente forçado pela descarga fluvial, $R_{ie} \approx 5,6$) indicam correntes de vazante ($u > 0$) bem mais intensas do

que os movimentos de enchente ($u < 0$), com intensidades variando entre os extremos de $-0,40$ m/s a $0,95$ m/s. Na sizígia (Fig. 3.13) o estuário foi forçado pela maré ($R_{ie} \approx 0,1$) restabelecendo-se a modulação semidiurna na escala temporal de 6-7 dias (Miranda et al., 2005) e a intensidade dos movimentos longitudinais apresentou-se menos assimétrica, com os extremos de velocidade variando entre $-0,80$ m/s a $1,10$ m/s.

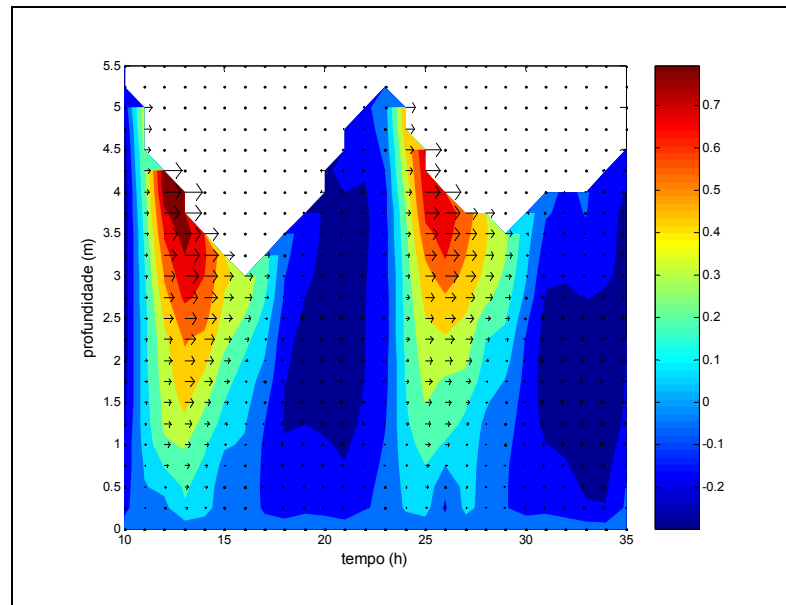


Figura 3.12 – Isopletas do componente longitudinal de velocidade longitudinal (m/s) durante dois ciclos semidiurnos (25 h) para a maré de quadratura ($u > 0$ e $u < 0$ indicam movimentos de vazante e enchente, respectivamente). Adaptada de Miranda et al., 2006.

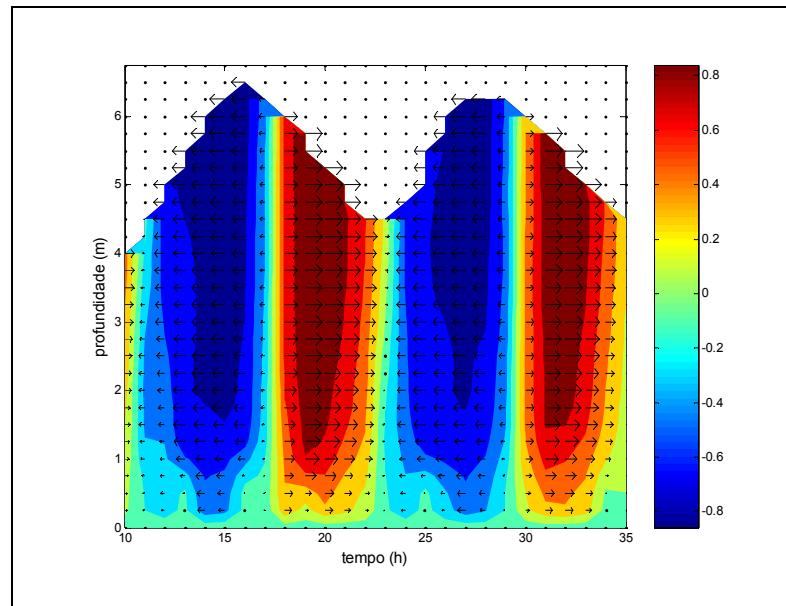


Figura 3.13 – Isopletas do componente longitudinal de velocidade longitudinal (m/s) durante dois ciclos semidiurnos (25 h) para a maré de sizígia ($u > 0$ e $u < 0$ indicam movimentos de vazante e enchente, respectivamente). Adaptada de Miranda et al., 2006.

3.2 – Validação do modelo

O modelo numérico foi processado nos modos barotrópico e baroclínico, simulando o período de modulação quinzenal da maré, abrangendo o período dos experimentos na estação 3 na quadratura [30 de abril (10:00h) a 01 de maio (11:00h) de 2001] e de sizígia [06 (10:00h) a 07 (11:00h) de maio de 2001]. O modelo foi processado utilizando as condições de contorno dos rios Cunhaú, Curimataú e Guaratuba apresentadas na Tabela 2.4 (Capítulo 2) e uma das saídas dos resultados do modelo foi adaptada para gerar e extrair os dados teóricos do elemento da grade situado nessa posição e correspondente ao período de observações. Esses resultados teóricos foram comparados aos dados experimentais e assim, estabelecer a validação dos modelos mediante o método *Skill* adaptado para as variações locais de propriedades (isopletas).

3.2.1 – Comparação de resultados no modo barotrópico

Os resultados do modo barotrópico foram simulados tendo como forçantes a maré e a descarga fluvial. Os dados de saída do modelo foram discretizados em 11 pontos de coordenada sigma (σ), desde a superfície até o fundo, de modo a estabelecer a comparação com os dados *in-situ*. Para os perfis de velocidade foi adotada a mesma condição de contorno de fundo (atrito máximo) utilizada por ocasião do processamento dos dados experimentais.

a) Maré de quadratura

A variação temporal da profundidade da coluna de água, $h=h(t)$ simulada para a maré de quadratura não apresentou boa concordância com os dados experimentais (Fig. 3.14). Os mínimos da profundidade da coluna de água estabelecida pelo modelo são $\approx 5,0$ m e os máximos $\approx 6,0$ m, com variações de até 1,0 m em relação aos dados coletados *in situ*. A defasagem entre estes valores é de mais de uma hora e o critério *Skill* de validação foi calculado em apenas 0,46.

Um grande problema apresentado na comparação dos resultados durante a maré de quadratura foi devido à dificuldade de ajuste para a amplitude e fase dos seis componentes de maré a serem aplicados no contorno aberto da região costeira no instante inicial da simulação (22 de abril de 2001 as zero hora). Como os dados obtidos durante a maré de sizígia não tiveram a presença significativa do efeito das intensas chuvas que sucederam as coletas na quadratura, que atenuaram a oscilação cíclica natural da maré, maior preocupação então, foi destinada a acertar a fase das componentes de maré para as observações de sizígia.

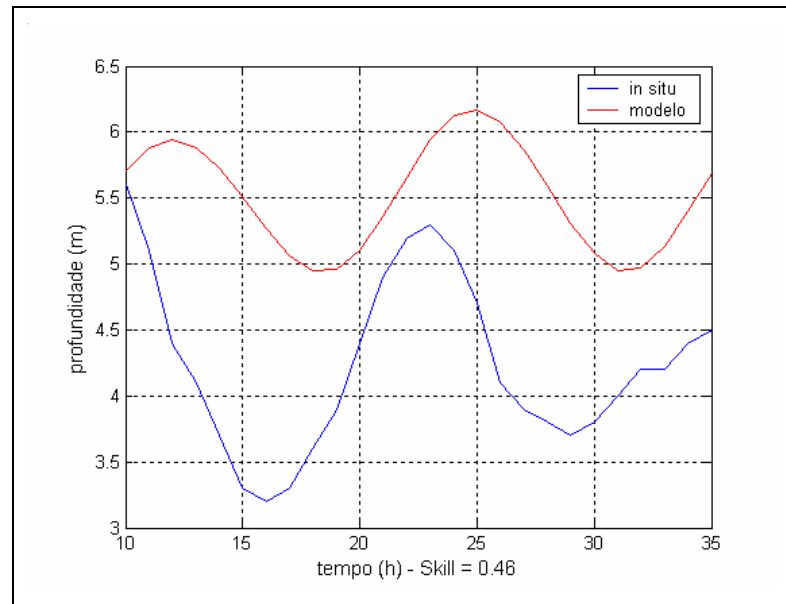


Figura 3.14 – Comparação da variação temporal da profundidade da coluna de água, durante o regime de maré de quadratura, entre os dados de observação e os resultados do modo barotrópico (estação 3).

A variação local dos resultados teóricos e experimentais de salinidade e os correspondentes valores do critério de validação *Skill* são apresentados comparativamente na figura 3.15. Como se observa não foi obtida uma boa concordância entre esses resultados e os valores do *Skill* são relativamente baixos na camada superficial ($<0,2$) e relativamente altos na cama mais profunda ($\approx 0,8$); esse resultado indica que a intrusão da AT está sendo bem simulada, enquanto que a influência da descarga fluvial na camada superficial não. Discrepâncias notáveis entre resultados da estrutura vertical de salinidade gerada por modelos numéricos e dados observacionais, principalmente quanto à simulação correta de gradientes verticais em haloclinas, foi recentemente reportada no trabalho de Warner et al. (2005).

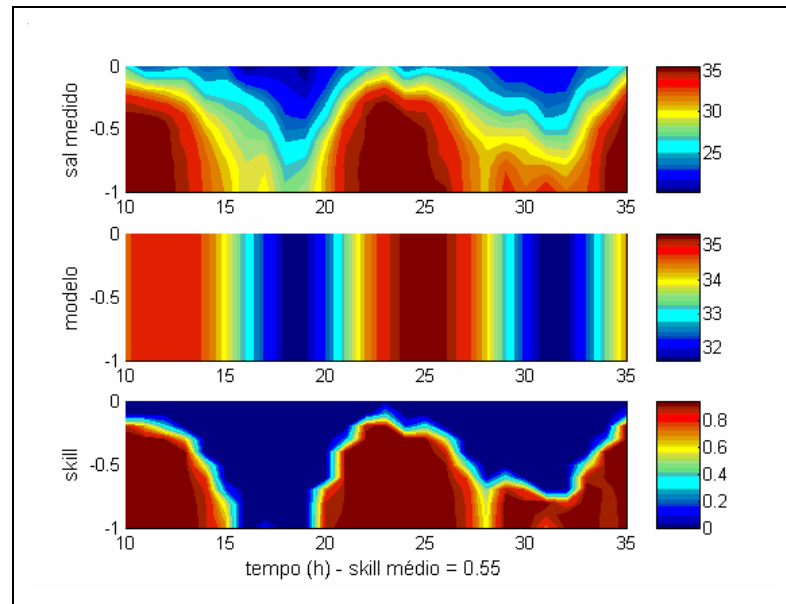


Figura 3.15 – Comparação da variação temporal da salinidade da coluna de água, durante o regime de maré de quadratura, entre os dados de observação e os resultados do modo barotrópico (estação 3).

A variação local das velocidades simuladas (Fig. 3.16) mostra valores muito pequenos em comparação com os resultados experimentais de vazante ($u > 0$) e de enchente ($u < 0$), além de uma defasagem de cerca de duas horas em relação às estofas de corrente ($u = 0$). O *Skill* para estas observações foi de 0,60.

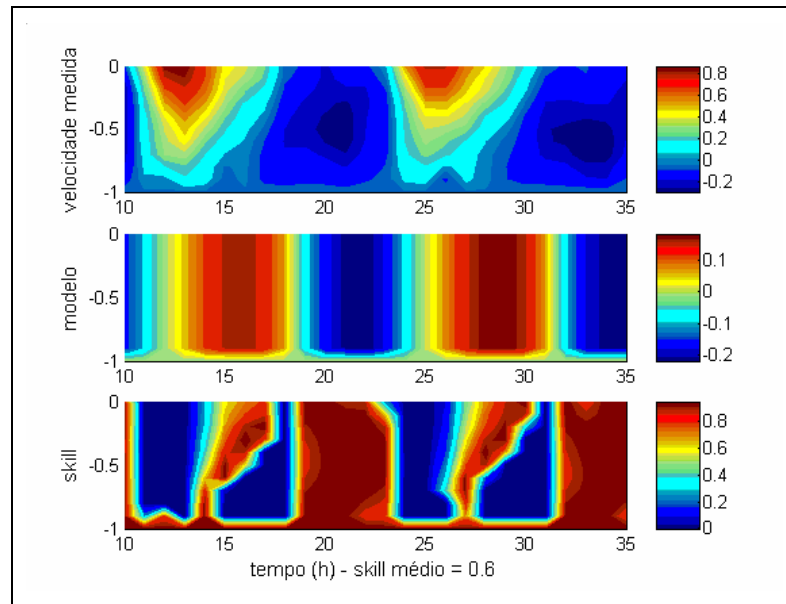


Figura 3.16 – Comparação da variação temporal da velocidade (m/s) na coluna de água, durante o regime de maré de quadratura, entre os dados de observação e os resultados do modo barotrópico ($u > 0$ e $u < 0$ indicam movimentos de vazante e enchente, respectivamente) (estação 3).

b-) Maré de sizígia

A comparação da variação temporal da profundidade da coluna de água, $h=h(t)$ (Fig. 3.17) durante a maré de sizígia apresenta um bom ajuste entre os dados observados e modelado. Tanto os limites de variação entre a profundidade mínima ($h_{\min} \approx 4,5$ m) e máxima ($h_{\max} \approx 6,5$ m) quanto a fase das oscilações foram adequadamente simuladas. O *Skill* calculado foi de 0,98 indicando quantitativamente um bom ajuste do modo barotrópico na maré de sizígia, o que não ocorreu na maré de quadratura (Fig. 3.14).

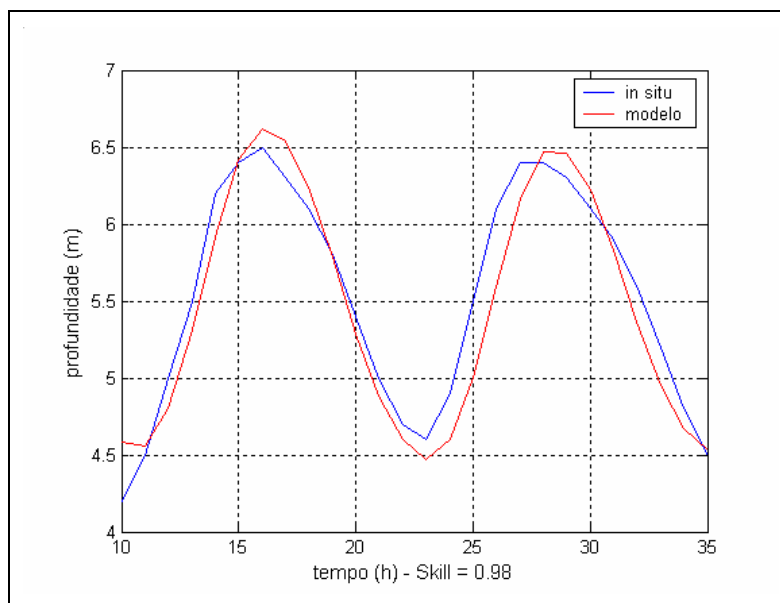


Figura 3.17 – Comparação da variação temporal da profundidade da coluna de água, durante o regime de maré de sizígia, entre os dados de observação e os resultados do modo barotrópico (estação 3).

As estruturas de salinidade obtidas numericamente (Fig. 3.18) demonstram um alto ajuste, na simulação com o modo barotrópico, na maré de sizígia, sendo o *Skill* médio igual a 0,96. Portanto, a intrusão da massa de água AT e a influência da descarga fluvial estão adequadamente representadas na simulação.

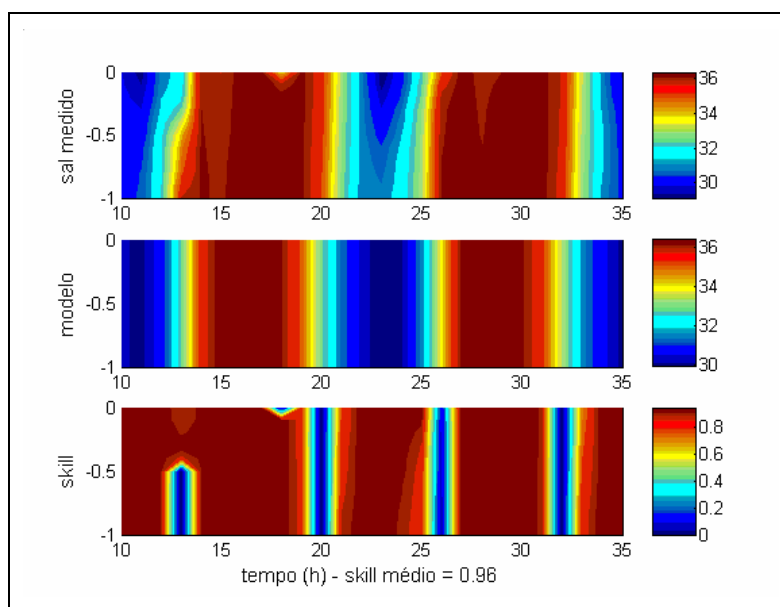


Figura 3.18 – Comparação da variação temporal da salinidade da coluna de água, durante o regime de maré de sizígia, entre os dados de observação e os resultados do modo barotrópico (estação 3).

A variação temporal das isopletas de velocidade calculadas numericamente e apresentadas comparativamente aos resultados experimentais (Fig. 3.19) são bem concordantes como indica o valor médio do *Skill* relativamente alto (0,79). Os movimentos estuário abaixo e acima têm duração de cerca de sete e seis horas respectivamente. Para um melhor ajuste seria necessário coincidir a fase das estofas de corrente ($u=0$) e intensificar os máximos e mínimos de velocidade que são um pouco menores do que as velocidades experimentais.

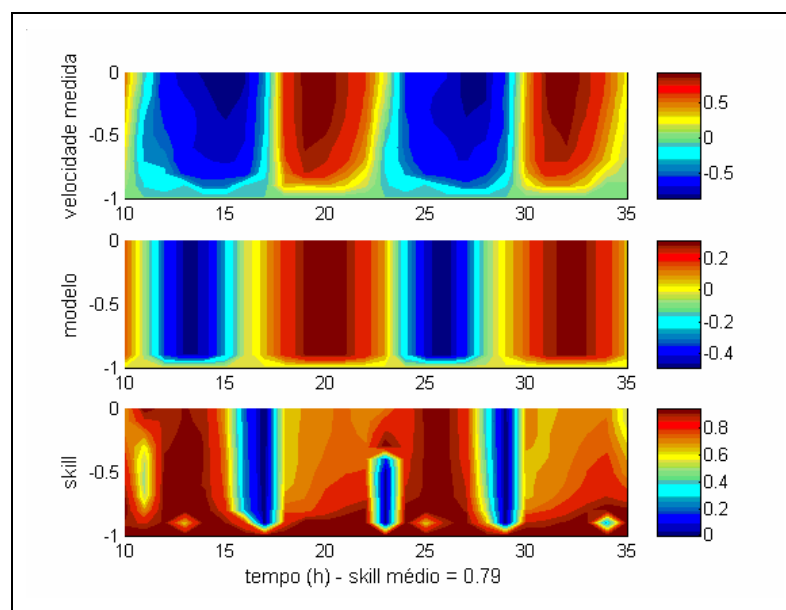


Figura 3.19 - Comparação da variação temporal da velocidade (m/s) da coluna de água durante o regime de maré de sizígia entre os dados de observação e os resultados do modo barotrópico ($u>0$ e $u<0$ indicam movimentos de vazante e enchente, respectivamente) (estação 3).

3.2.2 – Comparação de resultados no modo baroclínico

As simulações do modo baroclínico tiveram condições iniciais e de contorno similares para as estruturas de densidade e salinidade. O campo de temperatura foi mantido com o mesmo valor do modo barotrópico ($T=28^{\circ}\text{C}$). E, para que os resultados simulados pelo modo baroclínico pudessem ser validados com base nos dados experimentais, os perfis verticais teóricos das propriedades foram

discretização em 11 pontos da coordenada sigma (σ) e com a condição de contorno de atrito máximo no fundo ($u=0$).

c-) Maré de quadratura

As características apresentadas para a variação temporal da altura da coluna de água (Fig. 3.20) no modo baroclínico, foram semelhantes aquelas apresentadas para o modo barotrópico na maré de quadratura (Fig. 3.14), com índice médio *Skill* de validação relativamente baixo (0,46).

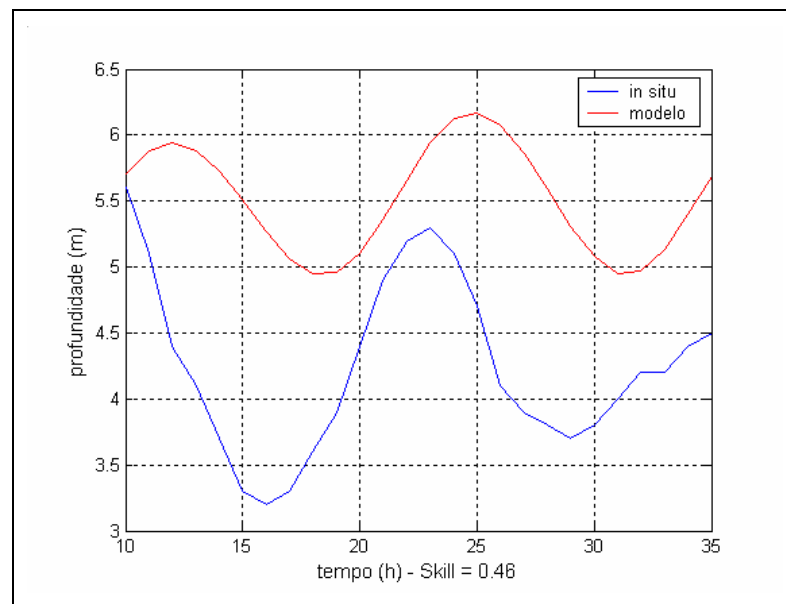


Figura 3.20 – Comparação da variação temporal da profundidade da coluna de água, durante o regime de maré de quadratura, entre os dados de observação e os resultados do modo baroclínico (estação 3).

Nesta simulação teórica da salinidade (Fig. 3.21) os valores mínimos e máximos de salinidade foram 32 e 35, respectivamente. Na camada de fundo o índice *Skill* foi superior a 0,8 indicando que a simulação da intrusão da massa de água da plataforma continental foi de boa qualidade; entretanto, nessa simulação ocorreram valores muito baixos ($Skill < 0,3$) e a simulação da diluição da massa de água de origem oceânica pela descarga fluvial não foi boa. O *Skill* médio (0,54) foi muito próximo ao obtido quando da simulação com o modo barotrópico (Fig. 3.15).

Os baixos valores do índice de validação das simulações teóricas se refletiram na qualidade das simulações da oscilação da média vertical, como fica evidente com a comparação destas com os experimentais (Fig. 3.22).

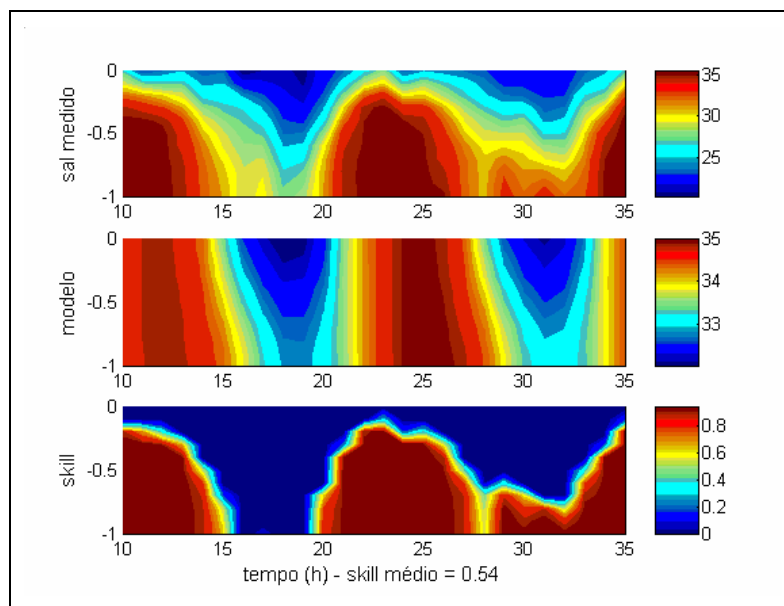


Figura 3.21 – Comparação da variação temporal da salinidade da coluna de água, durante o regime de maré de quadratura, entre os dados de observação e os resultados do modo baroclínico (estação 3).

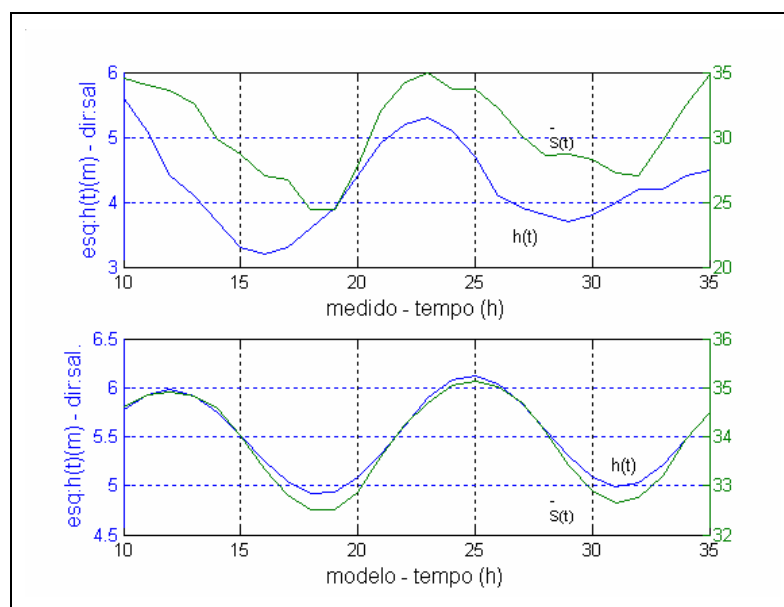


Figura 3.22 – Comparação da variação temporal da média vertical dos perfis de salinidade e da altura da coluna de água, durante o regime de maré de quadratura, entre os dados de observação e os resultados do modo baroclínico na estação 3. (Índice *Skill* médio 0,54).

Os resultados da simulação do módulo baroclínico na maré de quadratura, apresentados comparativamente aos correspondentes experimentais (Fig. 3.23), da mesma forma que as simulações do modo barotrópico (Fig. 3.16) mostram valores de velocidade muito inferiores (entre -0,20 m/s e 0,20 m/s) aos experimentais, resultado este confirmado pelo baixo valor do índice *Skill* (0,68).

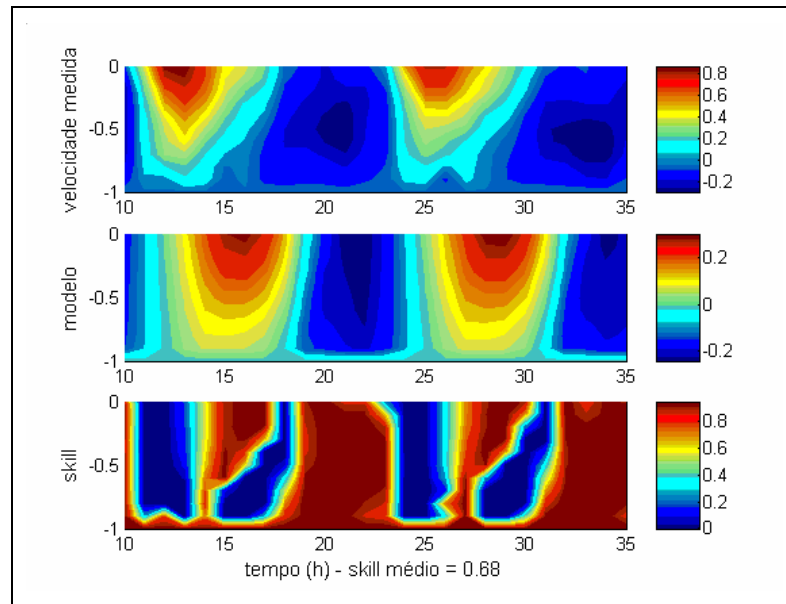


Figura 3.23 – Comparação da variação temporal da velocidade (m/s) da coluna de água, durante o regime de maré de quadratura, entre os dados de observação e os resultados do modo baroclínico ($u > 0$ e $u < 0$ indicam movimentos de vazante e enchente, respectivamente) (estação 3).

Os baixos valores do índice de validação das simulações teóricas se refletiram na qualidade da simulação da oscilação da velocidade média na coluna de água, como fica evidente com a comparação desses perfis com os experimentais (Fig. 3.24).

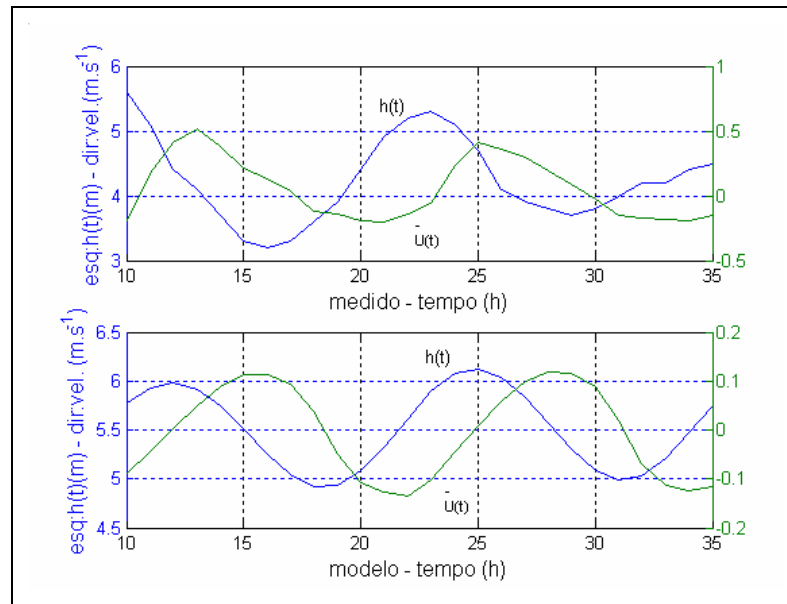


Figura 3.24 – Comparação da variação temporal da média vertical dos perfis de velocidade ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) e da altura da coluna de água, durante o regime de maré de maré de quadratura, entre os dados de observação e os resultados do modo baroclínico ($u>0$ e $u<0$ indicam movimentos de vazante e enchente, respectivamente) (estação 3). (Índice *Skill* médio 0,68).

d) Maré de sizígia

A comparação visual dos dados experimentais com os simulados da variação cíclica da profundidade com o modo barotrópico indica um ajuste muito bom (Fig. 3.25), confirmado quantitativamente pelo índice *Skill* médio próximo a um (0,98). Como vimos anteriormente resultado semelhante foi obtido por ocasião da simulação com o modo barotrópico na maré de sizígia (Fig. 3.17).

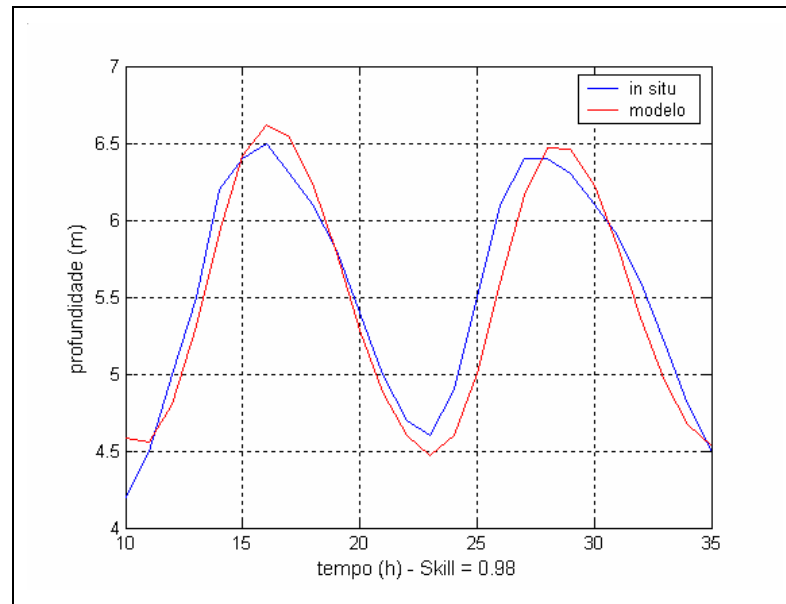


Figura 3.25 – Comparação da variação temporal da profundidade da coluna de água, durante o regime de maré de sizígia, entre os dados de observação e os resultados do modo baroclínico (estação 3).

As isopletas de salinidade simuladas (Fig. 3.26) apresentam maior concordância com os dados experimentais do que na condição de maré de quadratura (Fig. 3.21) e o valor do índice Skill médio (0,94) confirma quantitativamente esse resultado. Sendo assim, a intrusão da massa de água AT e a diluição mensurável da água do mar pela descarga fluvial são adequadamente simulados.

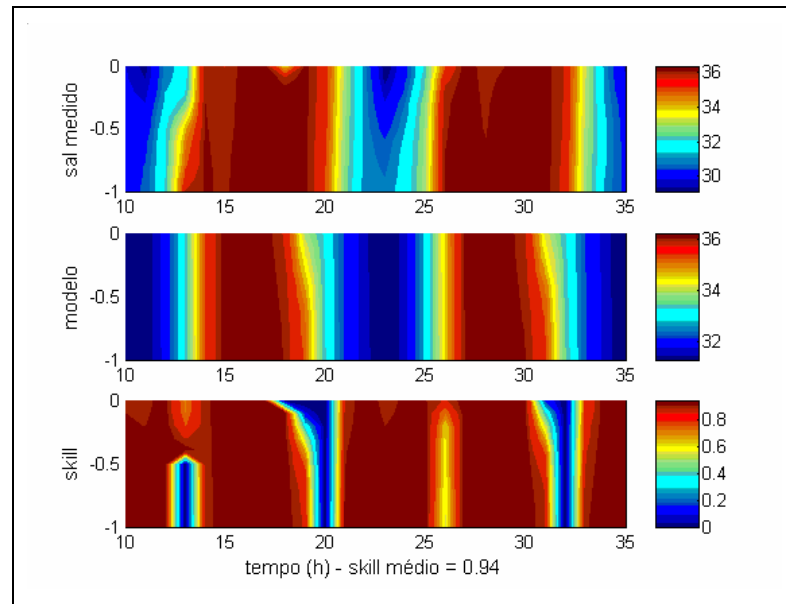


Figura 3.26 – Comparação da variação temporal da salinidade da coluna de água, durante o regime de maré de sizígia, entre os dados de observação e os resultados do modo baroclínico (estação 3).

Analisando a variação temporal da salinidade média na coluna de água (Fig. 3.27) verifica-se que durante os dois semiciclos diurnos a coluna de água apresenta um comportamento muito similar ao dos dados modelados, a coerência de fase entre maré e salinidade é verificada também para o resultado do modelo.

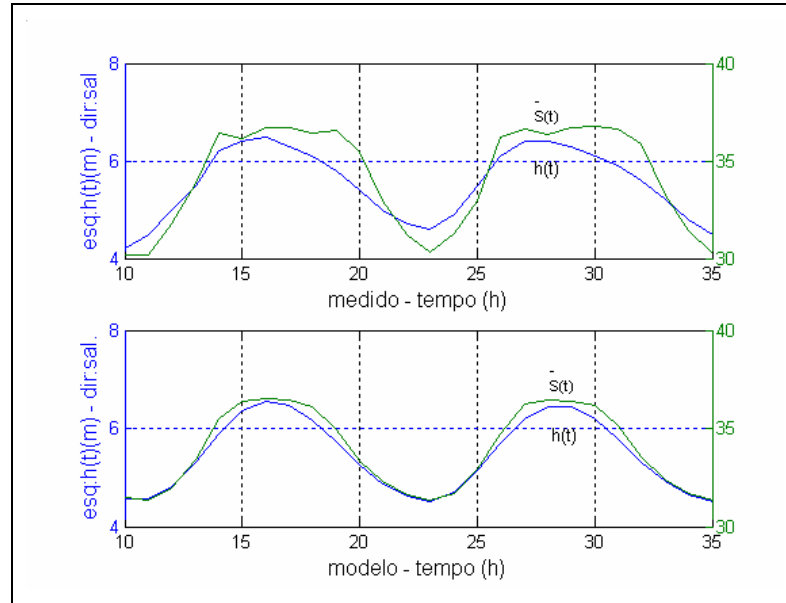


Figura 3.27 – Comparação da variação temporal da média vertical dos perfis de salinidade e da altura da coluna de água, durante o regime de maré de sizígia, entre os dados de observação e os dados do modo baroclínico na estação 3. (Índice *Skill* médio 0,94).

As isopletas de velocidade (Fig. 3.28), apresentam os seguintes limites positivo e negativo de velocidade $-0,35 < u(\text{m.s}^{-1}) < 0,40$, obtidos pela aplicação do modo baroclínico, bem abaixo dos valores observados. As velocidades estuário abaixo se mostram assimétricas com relação as estuário acima assim como no resultado obtido na maré de quadratura. O fluxo rio acima cerca de uma hora a menos que o estuário abaixo. O *Skill* calculado no período de sizígia foi de 0,80.

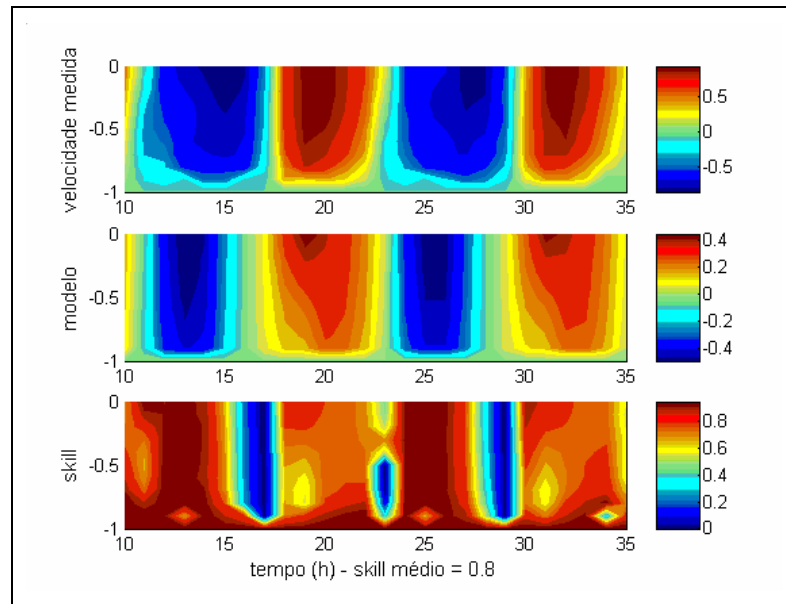


Figura 3.28 – Comparação da variação temporal da velocidade (m/s) da coluna de água, durante o regime de maré de sizígia, entre os dados de observação e os resultados do modo baroclínico ($u>0$ e $u<0$ indicam movimentos de vazante e enchente, respectivamente) (estação 3).

Analisando a variação temporal da velocidade média vertical obtida sob o regime da maré de sizígia (Fig. 3.29) observa-se que o padrão foi bem representado. Contudo, o grande problema foi em relação à assimetria entre as velocidades estuário acima e abaixo, em que se verifica um tempo maior para as velocidades estuário abaixo. A intensidade da corrente vista nas observações chega a superar o dobro do resultado do modo baroclínico em certos instantes de tempos.

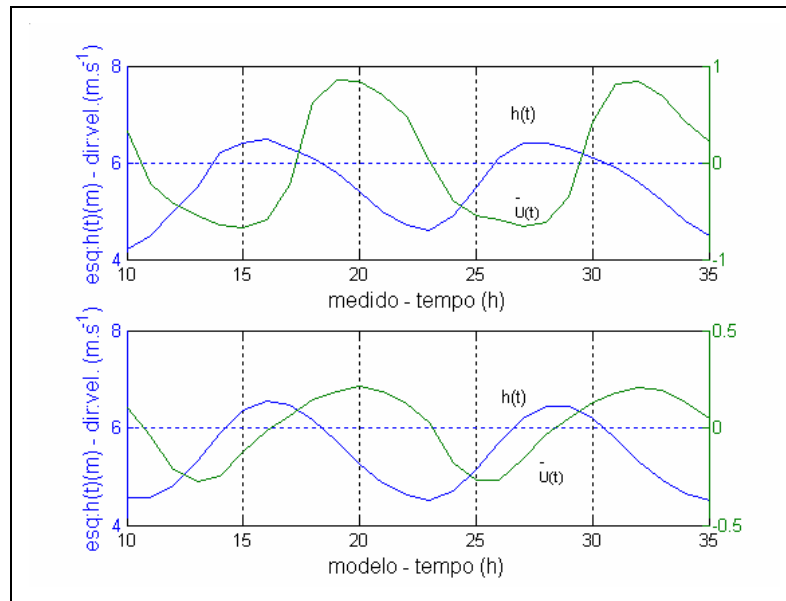


Figura 3.29 – Comparação da variação temporal da média vertical dos perfis de velocidade (m/s) e da altura da coluna de água, durante o regime de maré de sizígia, entre os dados de observação e os resultados do modo baroclínico ($u>0$ e $u<0$ indicam movimentos de vazante e enchente, respectivamente) (estação 3). (Índice *Skill* médio 0,80).