

A INFLUÊNCIA DA MARÉ E DA BATIMETRIA SOBRE A INTRUSÃO SALINA
NO ESTUÁRIO DO RIO ITAJAÍ-AÇU

Adriana Dantas Medeiros

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM
ENGENHARIA OCEÂNICA.

Aprovada por:

Prof. Afonso de Moraes Paiva, Ph. D.

Prof^a Susana Beatriz Vinzon, D. Sc.

Prof. Paulo Cesar Colonna Rosman, Ph. D.

Prof. Carlos Augusto França Schettini, D. Sc.

Prof. Bjorn Kjerfve, Ph. D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
MAIO DE 2003

MEDEIROS, ADRIANA DANTAS

A influência da maré e da batimetria
sobre a intrusão salina no estuário do rio
Itajaí-Açu [Rio de Janeiro] 2003

XII, 64 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc.,
Engenharia Oceânica, 2003)

Tese - Universidade Federal do Rio de
Janeiro, COPPE

1. Intrusão salina
2. Maré
3. Batimetria
4. Itajaí-Açu
5. Modelagem numérica

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

*A minha família,
Orlando, Cleonice, Andréia e João.*

AGRADECIMENTOS

Aos professores Susana Beatriz Vinzon e Afonso de Moraes Paiva, meus orientadores, por terem sempre apoiado e incentivado minha formação acadêmica, principalmente neste curso de pós-graduação e pela dedicação, acessibilidade e entusiasmo com que orientaram esta tese de mestrado, e ainda pela disponibilização do modelo numérico utilizado neste trabalho pelo professor Afonso.

Ao professor Carlos Augusto França Schettini, da Universidade do Vale do Itajaí - UNIVALI, pelo interesse e prontidão em fornecer os dados que foram analisados neste trabalho.

A minha família, pela confiança, paciência e apoio incondicional fornecidos durante toda minha vida e em especial durante este trabalho.

Aos amigos, pela compreensão e amizade, apesar da distância.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pelo apoio financeiro fornecido durante este curso de mestrado.

A todos os amigos da Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica, pela presença, carinho e incentivos durante os momentos difíceis.

Aos funcionários do Programa de Engenharia Oceânica pelo carinho e apoio dispensados.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

A INFLUÊNCIA DA MARÉ E DA BATIMETRIA SOBRE A INTRUSÃO SALINA
NO ESTUÁRIO DO RIO ITAJAÍ-AÇU

Adriana Dantas Medeiros

Maio/2003

Orientadores: Afonso de Moraes Paiva
Susana Beatriz Vinzon

Programa: Engenharia Oceânica

Trabalhos anteriores sobre o estuário do rio Itajaí-Açu têm destacado a influência da vazão fluvial sobre o alcance da intrusão salina. Apesar do estuário ser classificado como de micro-maré e da relativa importância da vazão fluvial em relação ao prisma de maré, as análises realizadas em 44 perfis longitudinais de salinidade, coletados no estuário nos anos de 1998-1999, sugerem que a maré exerce um importante papel sobre o padrão de estratificação do estuário. Alguns perfis mostram a existência de posições preferenciais da frente da intrusão salina, indicando a influência de feições batimétricas sobre o seu posicionamento. Esta tese tem por objetivos investigar a influência da maré e da batimetria sobre a intrusão salina e o seu deslocamento no estuário do rio Itajaí-Açu. Nesta investigação, foram analisados dados de salinidade e foi utilizado um modelo numérico bidimensional na vertical baroclínico. A maré se mostrou importante como fator de mistura vertical, influenciando o padrão de estratificação, a salinidade média e, por conseguinte o alcance da intrusão salina no estuário, sendo relevantes tanto sua amplitude, maré de sizígia ou quadratura, como o instante de maré considerado (vazante ou enchente). A presença de depressões batimétricas seguidas de soleiras se mostrou importante no deslocamento da intrusão salina, seja retardando-a ou ainda aprisionando-a nas soleiras.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

THE INFLUENCE OF TIDE AND BATHYMETRY ON THE SALINE INTRUSION
IN THE ESTUARY OF ITAJAI-AÇU RIVER

Adriana Dantas Medeiros

May/2003

Advisors: Afonso de Moraes Paiva
Susana Beatriz Vinzon

Department: Ocean Engineering

Previous investigations of the Itajaí-Açu estuary have evaluated the influence of fluvial discharge on the saline intrusion length. Despite the estuary being microtidal and the importance of the river flow relative to the tidal prism, the analyses of 44 longitudinal salinity profiles, collected in the estuary during 1998-1999, suggests that the tide exerts an important role on the estuarine stratification. Some of the profiles indicated preferential locations for the salinity front, suggesting that the bathymetry controls the locations of the front. This study investigates the influence of tide and bathymetry on the saline intrusion and the location of the salinity front along the Itajaí-Açu estuary. Salinity data were analyzed, and a baroclinic two-dimensional numerical model was used. The tide proved to be an important role as a source of vertical mixing, influencing the stratification pattern, the amount of salt in the estuary, and therefore, the extension of the saline intrusion. The tidal amplitude, spring or neap tides, and the instant of the tide, ebb or flood. The presence of bathymetric depressions and sills seemed to determine the location of the saline intrusion, either delaying it or arresting it behind the sills.

ÍNDICE TEMÁTICO

1 - INTRODUÇÃO	1
2 - ÁREA DE ESTUDO – ESTUÁRIO DO RIO ITAJAÍ-ACU	6
3 - METODOLOGIA	13
3.1 – DADOS DE CAMPO	13
3.2 – MODELOS MATEMÁTICO E NUMÉRICO	15
3.2.1 – MODELO MATEMÁTICO	15
3.2.1.1 - Coeficientes de mistura turbulenta	16
3.2.1.2 - Condições de Contorno	17
3.2.2 – TRANSFORMAÇÃO DE COORDENADAS	19
3.2.2.1 - Problemas associados à transformação de coordenadas.	22
3.2.3 – MODELO NUMÉRICO	26
3.2.3.1 – Esquema numérico	26
3.2.4 – CONFIGURAÇÃO DO MODELO	28
4 – RESULTADOS	32
4.1 – A INFLUÊNCIA DA MARÉ	32
4.1.1 - ANÁLISE DOS DADOS DE CAMPO	32
4.1.2 - ANÁLISE DOS RESULTADOS NUMÉRICOS	43
4.2 – A INFLUÊNCIA DA BATIMETRIA	49
4.2.1 – INFLUÊNCIA DE SOLEIRAS NA PROPAGAÇÃO DA CUNHA SALINA	50
5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	58
6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1 - Fotografia da foz do estuário do rio Itajaí-Açu. Observa-se a presença das obras de melhoramento realizadas com o objetivo de estabilização da embocadura, além de meandros bem definidos 6
- Figura 2 - Hidrograma do rio Itajaí-Açu, período de Janeiro/98 a Agosto/99. Estação limnimétrica de Indaial..... 8
- Figura 3 - Reconstituição da maré prevista para o Porto de Itajaí do mês de Agosto/99 pela DHN. Base de dados utilizada para previsão referente ao período de 31/03/1960 a 22/03/1961..... 8
- Figura 4 - Representação em planta da batimetria do estuário do rio Itajaí-Açu. Encontram-se representadas em (a) todo o trecho levantado e em detalhe os trechos 1 e 2. (b) em detalhe os trechos 3, 4 e 5. As principais depressões (setas vermelhas em linha pontilhada) e as principais soleiras (setas azuis em linha cheia) estão marcadas na figura assim como referências a cada 5 km..... 11
- Figura 5 - Perfil longitudinal da topografia de fundo do estuário do rio Itajaí-Açu, para as profundidades média e máxima na seção transversal a cada 1 km. 12
- Figura 6 - Figura esquemática mostrando o efeito da transformação de coordenadas sigma sobre o domínio de modelagem e sobre a grade numérica 20
- Figura 7 - Figura esquemática mostrando que o cálculo do gradiente de pressão horizontal, que neste exemplo, seria determinado em pontos com mesma densidade (setas com linha pontilhada), ao ser calculado ao longo de coordenadas sigma (setas com linha cheia) em regiões com forte declividade do fundo, seria determinado como o diferencial de dois pontos com densidades diferentes. ($\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$) 24
- Figura 8 - Perfis de salinidade impostos como condição de contorno na extremidade de jusante do modelo numérico, de acordo com a maré, sizígia (linha pontilhada) ou quadratura (linha cheia)..... 30
- Figura 9 - Perfil longitudinal representado pelas isolinhas de salinidade, obtido em maré de sizígia onde os pontos referem-se aos pontos utilizados na coleta dos dados. O fundo mostrado refere-se a batimetria com profundidades máximas apresentada na figura 5. Dados obtidos no dia 13/08/99 após a baixamar com vazão de 134 m³/s. 34
- Figura 10 - Perfil longitudinal representado pelas isolinhas de salinidade, obtido em maré de quadratura onde os pontos referem-se aos pontos utilizados na coleta dos dados. O fundo mostrado refere-se a batimetria com profundidades máximas apresentada na figura 5. Dados obtidos no dia 20/08/99 após a preamar com vazão de 141 m³/s. 34

Figura 11 - Média e desvios padrão dos gradientes máximos de salinidade na vertical, em cada seção de coleta ao longo do estuário, para as marés de sizígia e quadratura.....	36
Figura 12 - Média e desvios padrão dos gradientes máximos de salinidade na vertical, em cada seção de coleta ao longo do estuário, para diferentes classes de vazão. ...	36
Figura 13 - Posição da isolinha de salinidade de 2 em função da vazão fluvial, para as marés de sizígia e quadratura, sendo discriminados ainda os diferentes instantes de maré.....	38
Figura 14 - Posição da isolinha de salinidade de 30 em função da vazão fluvial, para as marés de sizígia e quadratura, sendo discriminados ainda os diferentes instantes de maré.....	38
Figura 15 - Perfil de salinidade obtido através de dados coletados em maré de sizígia após a preamar no dia 04/03/99 com vazão de 266 m ³ /s.....	39
Figura 16 - Perfil de salinidade obtido através de dados coletados em maré de sizígia após a baixamar no dia 22/10/99 com vazão de 291 m ³ /s.....	39
Figura 17 - Variação da tensão do fundo em função dos diferentes mecanismos de enchente e vazante.....	40
Figura 18 – Salinidade média no estuário para os perfis obtidos em maré de quadratura em função da vazão fluvial e também do instante de maré.....	42
Figura 19 – Salinidade média no estuário para os perfis obtidos em maré de sizígia em função da vazão fluvial e também do instante de maré.....	42
Figura 20 - Variação da salinidade média no estuário ao longo de um ciclo de maré, para diferentes amplitudes de maré sizígia (0,4 m) e quadratura (0,1 m) e duas situações de vazão fluvial (150 e 300 m ³ /s). Resultados obtidos com modelagem numérica.....	43
Figura 21 - Perfis de salinidade resultantes da simulação numérica para a maré de sizígia (amplitude = 0,4 m) com vazão de 140 m ³ /s em quatro instantes de maré: (a) início da enchente, (b) máxima enchente, (c) início da vazante e (d) máxima vazante.....	46
Figura 22 - Perfis de salinidade resultantes da simulação numérica para a maré de quadratura (amplitude = 0,1 m) com vazão de 140 m ³ /s em quatro instantes de maré: (a) início da enchente, (b) máxima enchente, (c) início da vazante e (d) máxima vazante.....	47
Figura 23 - Efeito da batimetria sobre a propagação e forma da cunha salina, considerando diferentes topografias de fundo. (a) fundo plano e horizontal; (b) fundo plano com declividade; (c) batimetria real com profundidades médias e (d) batimetria real com máximas profundidades.....	51

- Figura 24 - Posicionamento da isolinha de salinidade 2 em função do tempo de simulação. Experimento A foi realizado com a batimetria real, e o experimento B apresenta a mesma batimetria, mas com profundidades constantes entre os quilômetros 26 e 30, apresentadas em detalhe no canto inferior da figura. 53
- Figura 25 - Posicionamento da isolinha de salinidade 2 em função do tempo, para vazões variando de 300 a 100 m³/s durante a simulação. No retângulo em destaque percebe-se o aprisionamento provocado pela soleira situada no quilômetro 21 para determinada faixa de vazões..... 54
- Figura 26 - Perfis longitudinais e verticais de salinidade obtidos pela modelagem numérica da (a) 1^a. a 6^a. e (b) da 7^a. a 12^a. hora do segundo ciclo de simulação. ... 57

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Distribuição das amostras coletadas de acordo com a maré, vazão fluvial e instante de maré.....	14
------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

LISTA DE SÍMBOLOS

g	=	aceleração da gravidade
h	=	profundidade do estuário em relação ao nível médio
n	=	coeficiente de Manning
s	=	salinidade
t	=	dimensão temporal
t'	=	dimensão temporal em coordenada transformada
u	=	velocidade longitudinal
w	=	velocidade vertical
x	=	dimensão longitudinal
x'	=	dimensão horizontal em coordenada transformada
z	=	dimensão vertical
A_H	=	coeficiente de viscosidade turbulenta horizontal
A_V	=	coeficiente de viscosidade turbulenta vertical
B	=	largura do estuário
H	=	profundidade total da coluna d'água ($h + \eta$)
K_H	=	coeficiente de difusão turbulenta horizontal
K_V	=	coeficiente de difusão turbulenta vertical
R_i	=	número de Richardson
R_{ic}	=	número de Richardson crítico
α, β	=	coeficientes da equação de estado
η	=	elevação da superfície
k	=	coeficiente de atrito no fundo e laterais
k_l	=	coeficiente de ajuste
ρ	=	densidade
ρ_0	=	densidade de referência
σ	=	dimensão vertical em coordenada transformada
τ_F	=	tensão de atrito no fundo
Δx	=	intervalo de discretização espacial longitudinal
Δt	=	intervalo de discretização temporal
Δz	=	intervalo de discretização espacial vertical
$\Delta \sigma$	=	intervalo de discretização espacial vertical em coordenada transformada

1 - Introdução

Estuários são corpos d'água costeiros com grande importância econômica e biológica. São ecossistemas ricos em recursos naturais, mas com inúmeras características que tornam o estudo destes corpos d'água extremamente complexo. Esta complexidade, em termos hidrodinâmicos e dos processos de transporte de contaminantes e sedimentos, é proveniente da interação de condicionantes distintas como vazão fluvial, maré, topografia irregular do fundo, estratificação de densidade e tensões superficiais provocadas pelo vento.

Na tentativa de se conhecer os fenômenos físicos envolvidos nestes corpos d'água naturais, programas de levantamento de dados de campo são realizados e analisados. A análise destes dados fornece informações valiosas, mas também sugerem novas indagações sobre o assunto. Por outro lado, a diversidade dos fatores envolvidos muitas vezes dificulta a obtenção de respostas, pela análise de dados, sobre as interações existentes neste sistema complexo. Neste sentido, a utilização de ferramentas complementares que possam levar em consideração vários destes fatores, para contribuir com a compreensão do fenômeno físico em questão se faz necessária. Nas últimas décadas, o desenvolvimento de modelos numéricos hidrodinâmicos, associado ao aumento de potência dos computadores, tem permitido a utilização da modelagem numérica como instrumento de pesquisa de forma corrente. A reprodução de condições observadas no campo pela modelagem permite a caracterização da circulação do corpo d'água, atuando o mesmo de forma descritiva; como ferramenta de base para planejamento e gestão de sistemas costeiros, funcionando como um modelo previsivo para situações hipotéticas; ou ainda como ferramenta de pesquisa para investigação de importantes fenômenos físicos. A escolha na utilização de determinado modelo frente à diversidade de modelos existentes deve ser feita de forma criteriosa, de tal forma que leve em conta a capacidade do modelo em representar as características principais do corpo d'água, de acordo com a escala de interesse, e considerando as aproximações existentes; aliada ao custo computacional envolvido.

A intrusão salina em estuários tem sido objeto de estudo em todo o mundo, principalmente para aqueles estuários que apresentam certo grau de estratificação (FORD et al., 1990, JAY e SMITH, 1990, KURUP et al., 1998, WANG e KRAVITZ,

1980, WANG, 1998). Dentre os fatores que motivam tais estudos, destacam-se: (a) a presença da zona de turbidez máxima, que é caracterizada por uma alta concentração de sedimentos em suspensão, e cujo destino final é de grande interesse em função de problemas de assoreamento que possa vir a causar e da adsorção de contaminantes pelos sedimentos (DYER, 1997); (b) o carreamento de sedimentos marinhos em decorrência do transporte residual de fundo para montante; (c) os efeitos da estratificação sobre a estabilidade da coluna d'água, atuando sobre a qualidade da água e podendo levar a anoxia das camadas do fundo (KURUP et al., 1998); (d) ao aprisionamento de efluentes domésticos ou industriais em determinadas camadas na coluna d'água; (e) ao avanço da intrusão salina, podendo afetar as captações de água doce para utilização industrial (MEDEIROS e VINZON, 2000) ou para o abastecimento de cidades situadas às margens (McANALLY e PRITCHARD, 1997).

O estuário do rio Itajaí-Açu é um exemplo de estuário estratificado na costa brasileira e que vem sendo alvo de pesquisas nos últimos anos, em razão de sua grande importância econômica na região de Santa Catarina. Em um estudo apresentado por DOBEREINER (1986) observa-se o comportamento salino do estuário para diferentes situações de vazão. Neste trabalho verifica-se que o estuário se apresenta normalmente na forma estratificada para vazões médias de 225 m³/s, onde a cunha salina penetra até aproximadamente 18 km da foz. Para vazões maiores (de 400 a 900 m³/s) a cunha salina oscila em um trecho de cerca de 10 km a partir da foz e para vazões acima de 900 m³/s a cunha salina é praticamente expulsa do estuário.

SCHETTINI (2001) apresenta uma descrição física do estuário do rio Itajaí-Açu, além de características hidrológicas, hidrodinâmicas e sedimentológicas. A respeito da hidrodinâmica estuarina, o estuário é classificado como de cunha salina através do diagrama de estratificação/circulação de HANSEN e RATTRAY (1966), baseado em amostragens realizadas no estuário.

SCHETTINI e TRUCCOLO (1999a) modelaram de forma empírica o estuário do rio Itajaí-Açu e mostraram que existe uma relação entre o alcance da intrusão salina e a vazão fluvial. Seus dados, porém apresentam uma dispersão significativa em torno do ajuste proposto, sugerindo que outros fatores desempenhem papel importante na

penetração salina do estuário. Um fator potencialmente importante é o efeito da penetração da onda de maré no estuário.

Em dois perfis longitudinais de salinidade obtidos por DOBEREINER (1986), no trecho inferior do estuário do rio Itajaí-Açu observa-se uma diferença no alcance da intrusão salina em função dos instantes de maré, preamar e baixamar, em torno de 6 km, para uma vazão fluvial de 611 m³/s e amplitude de maré de 0,6 m. No presente trabalho, uma análise preliminar em dados de salinidade coletados recentemente no mesmo estuário mostrou variações no alcance da intrusão de acordo com o instante de maré, indicando a influência da maré sobre a intrusão salina dentro de um ciclo de maré. Por outro lado, analisando-se os dados quanto ao estado da maré, sizígia ou quadratura, verificaram-se diferentes graus de estratificação em função da maré, observando-se em geral um padrão salino estratificado para os perfis obtidos em maré de quadratura e mais misturado em sizígia. Isso também é observado em outros estuários, como por exemplo, o estuário do rio Tweed no Reino Unido onde UNCLES e STEPHENS (1996) avaliaram a influência da maré sobre a estratificação de salinidade e a intrusão salina entre outros fatores. Através de uma campanha de medições realizada em um período de duas semanas, abrangendo marés de sizígia-quadratura, a intrusão salina se mostrou afetada pela estado de maré e em menor grau pela vazão fluvial. Valores máximos estimados do número de Richardson estuarino ocorreram durante a maré de quadratura e mínimos durante a maré de sizígia. A variação entre os valores extremos encontrados sugeriu a ocorrência de condições de estratificação e maior mistura, dependendo da maré e da vazão fluvial.

Em um trabalho de campo realizado por SCHETTINI e TRUCCOLO (1999b) no estuário do rio Itajaí-Açu, para avaliar a influência da maré sobre a estrutura estuarina analisou-se a variação longitudinal de salinidade por aproximadamente um ciclo de maré (10 horas). A vazão fluvial durante a campanha era em torno de 445 m³/s, porém não permanente, as elevações devidas à maré foram também registradas apresentando pequenas variações de amplitude características da maré de quadratura. A avaliação foi realizada em função das posições alcançadas pelas isolinhas de salinidade de 2 e 30 a cada 2 horas. Observa-se uma grande variabilidade da isolinha de salinidade de 30 durante o ciclo de maré, enquanto que a de 2 praticamente não sofre alterações de posição, mantendo-se durante todo ciclo em torno do quilômetro 14. É interessante

notar que justamente nesta posição encontra-se uma depressão batimétrica com cerca de 11 m de profundidade, e que esta depressão pode afetar o deslocamento da intrusão salina no estuário. Levantamentos batimétricos recentemente realizados, e cedidos para este trabalho por Schettini (comunicação pessoal), permitiram identificar a presença de profundas depressões em algumas regiões e também de baixios, indicando que a batimetria pode desempenhar um importante papel na intrusão salina.

VIEIRA e BORDALO (2000) realizaram um estudo no estuário do rio Douro (Portugal) e verificaram que a presença de depressões batimétricas mantém a cunha salina aprisionada em três posições predominantes para determinadas faixas de vazões. Esta verificação explica o fraco ajuste obtido nesse caso na tentativa de se correlacionar vazão fluvial e alcance da intrusão salina. Um outro exemplo de estuário estratificado é dado pelo rio Mississipi que, de acordo com McANALLY e PRITCHARD (1997), apresenta uma topografia de fundo com depressões que chegam a aproximadamente 60 m de profundidade intercaladas por soleiras naturais com cerca de 20 m. As observações mostraram que durante a descida do hidrograma a cunha salina se mantém aprisionada em uma dada soleira para uma faixa de vazões, até que se atinja um valor crítico de vazão. Quando isto ocorre a cunha consegue mover-se para montante até alcançar uma outra soleira.

Em razão do discutido, este trabalho tem por objetivos principais:

- Investigar a influência da maré sobre a intrusão salina no estuário do rio Itajaí-Açu .
- Investigar a influência da batimetria no deslocamento da intrusão salina.

A fim de atingir estes objetivos, dados de salinidade coletados no estuário pelo grupo de pesquisa da Universidade do Vale do Itajaí – UNIVALI (Schettini, comunicação pessoal) e cedidos para este trabalho foram analisados onde se procurou avaliar a influência da maré sobre o padrão salino e também quanto à salinidade média no estuário. A modelagem numérica foi utilizada de forma complementar para avaliar situações que os dados não contemplaram, bem como efetuar simulações comparativas para verificar a influência da batimetria.

No caso do rio Itajaí-Açu, que apresenta dimensões longitudinais muito maiores que as dimensões laterais e verticais além de grandes variações verticais de densidade, o escoamento pode ser representado através de um modelo bidimensional na vertical. O modelo numérico utilizado, em coordenadas sigma, é capaz de simular a intrusão salina considerando os efeitos advectivos, difusivos, barotrópico e baroclínico. Este modelo baseou-se no modelo desenvolvido por PAIVA (1992), com a inclusão de modificações referentes ao esquema numérico, de melhorias no tratamento de condições de contorno realizadas por PAIVA (comunicação pessoal), e também pela inclusão, neste trabalho, de termos de correção no termo de difusão horizontal e discretização de maior ordem para o termo de pressão baroclínico em função dos problemas associados à transformação sigma.

No capítulo 2 é feita uma descrição das principais características do estuário do rio Itajaí-Açu. O capítulo 3 descreve a metodologia utilizada neste trabalho referente a apresentação dos dados de salinidade utilizados e a uma descrição do modelo numérico empregado, além de uma discussão sobre problemas associados à transformação sigma de coordenadas utilizada no modelo e presente na literatura. Os resultados obtidos pela análise dos dados e pelas simulações numéricas são apresentados e discutidos no capítulo 4. Finalmente, no capítulo 5 há um sumário, conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

2 - Área de Estudo – Estuário do rio Itajaí-Açu

O estuário do rio Itajaí-açu vem sendo objeto de diversos estudos hidráulico-sedimentológicos nos últimos anos, principalmente devido à grande importância econômica, tanto local como regional, do porto de Itajaí. O porto está localizado na região mais industrializada de Santa Catarina e destaca-se na exportação de carga geral e containerizada. Foram realizadas obras de melhoramento na embocadura do estuário com o objetivo de regularização e aprofundamento do canal de acesso ao porto. A estabilização da embocadura foi conseguida com a construção de 2 molhes ligeiramente convergentes além de 8 espigões transversais e outros 3 longitudinais (OTTONI, 1986). Estas obras de melhoramento podem ser visualizadas na figura 1, que representa uma fotografia da foz do estuário, observa-se também a presença dos meandros existentes no seu trecho inicial. A manutenção do canal de acesso é realizada através de constantes dragagens. Estas obras de dragagem, visando o aprofundamento do canal de acesso, provocam alterações no processo sedimentológico do estuário já que tendem a aumentar a intrusão salina e, de acordo com OTTONI (1986), podem provocar uma maior penetração de materiais arenosos de origem marinha.



Figura 1 - Fotografia da foz do estuário do rio Itajaí-Açu. Observa-se a presença das obras de melhoramento realizadas com o objetivo de estabilização da embocadura, além de meandros bem definidos

O estuário do rio Itajaí-Açu recebe o aporte de uma bacia de drenagem com cerca de 15.500 km². Sua extensão é aproximadamente de 70 km, considerando-se como limite de montante a penetração máxima da maré, uma vez que as oscilações de nível provocadas pela onda de maré são sentidas até a cidade de Blumenau. A estação limnimétrica de Indaial, situada a 90 km da foz, efetua o monitoramento diário de cotas e conseqüentemente da descarga líquida representando 70% da descarga de toda a área da bacia. O regime hidrológico do rio Itajaí-Açu é bastante variável ao longo do tempo. Dados de vazão diária no período de 1934 a 1998 de Indaial fornecem uma vazão média diária de 228 m³/s com vazão mínima de 17 e máxima de 5390 m³/s (SCHETTINI, 2001). Na figura 2 tem-se o hidrograma referente ao período de Janeiro/98 a Agosto/99 disponibilizados pela ANEEL. Observa-se uma grande variabilidade temporal das vazões com a presença de pulsos de alta descarga. Estas oscilações estão associadas a duas causas básicas, aos fatores climáticos, ou seja, intensidade e duração de precipitações, e principalmente devidas aos fatores fisiográficos, tais como formato e extensão da bacia hidrográfica. De fato, o formato aproximadamente circular da bacia do rio Itajaí-Açu sugere que os efeitos ocasionados por precipitações na bacia sejam rapidamente sentidos no seu ponto de saída.

A maré na região é semi-diurna com desigualdades, com amplitudes médias na foz do estuário de ~0,2 m na quadratura e de ~0,6 m na sizígia, caracterizando um estuário de micromaré (SCHETTINI, 2001). Na figura 3 encontra-se representada uma reconstituição da maré a partir da maré prevista pela DHN para o porto de Itajaí para o mês de Agosto de 1999. As informações sobre a propagação da onda de maré no estuário são de que nos primeiros 7 quilômetros do estuário não haveria praticamente alterações nas amplitudes de maré e nos períodos de enchente e vazante, e que haveria uma defasagem da onda de maré de cerca de 25 minutos, de acordo com DOBEREINER (1986). Segundo SCHETTINI (2001) oscilações de nível devidas à maré seriam observadas até a cidade de Blumenau, com variações de cerca de 15 cm durante as marés de sizígia. Ainda, de acordo com SCHETTINI (2001), pela passagem de frentes frias na região pode-se observar sobre elevações do nível d'água devidas à maré meteorológica da ordem de 1 m. Não há, no entanto, informações sobre a propagação da onda de maré ao longo do estuário e também se a mesma se comporta como onda progressiva ou estacionária.

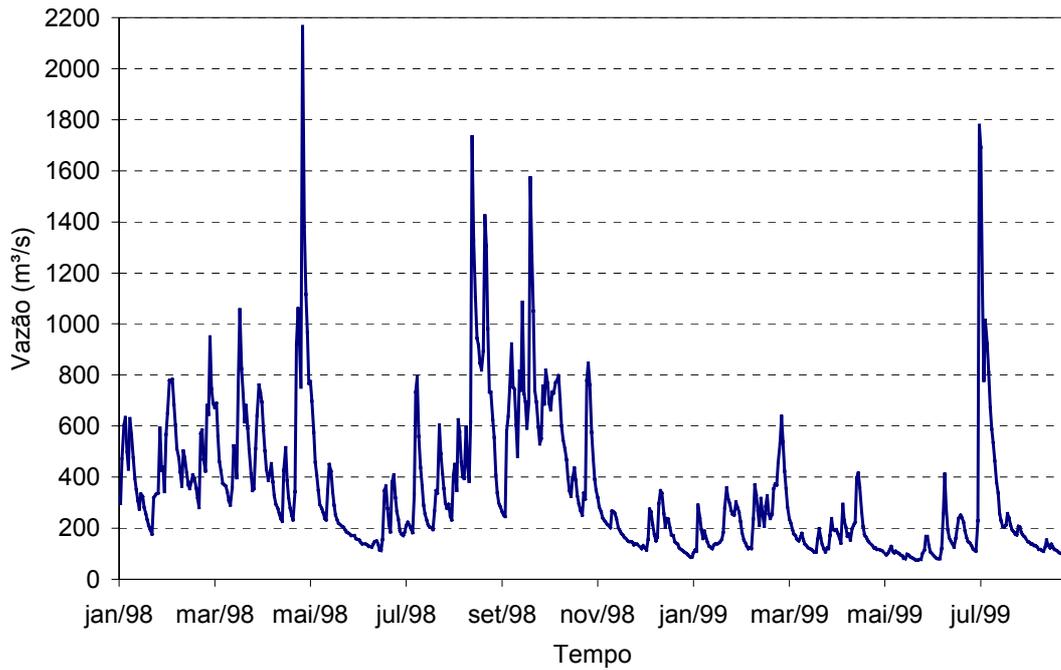


Figura 2 - Hidrograma do rio Itajaí-Açu, período de Janeiro/98 a Agosto/99. Estação limnimétrica de Indaial

Fonte: ANEEL

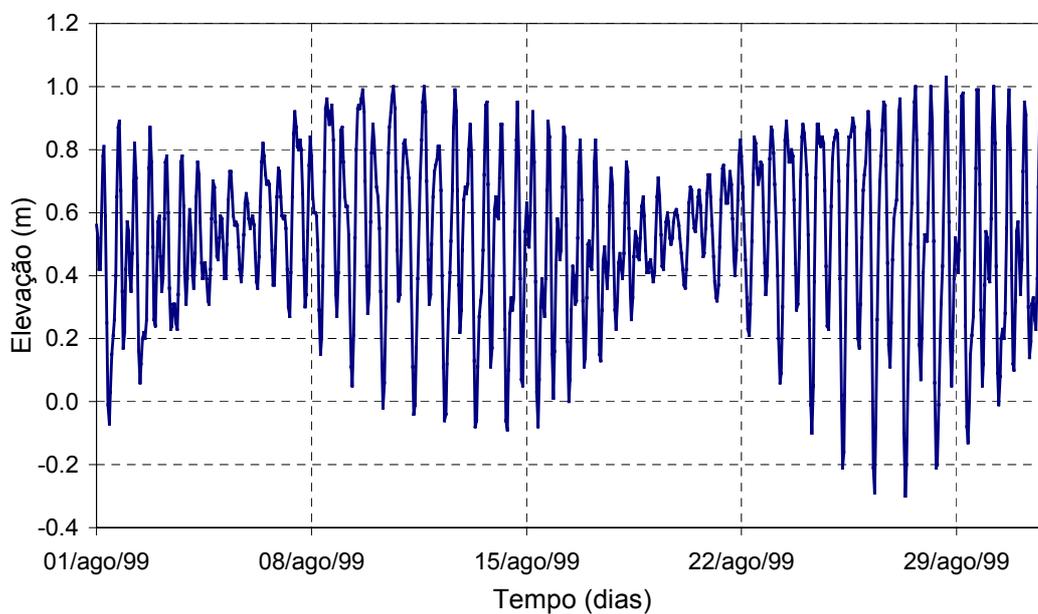
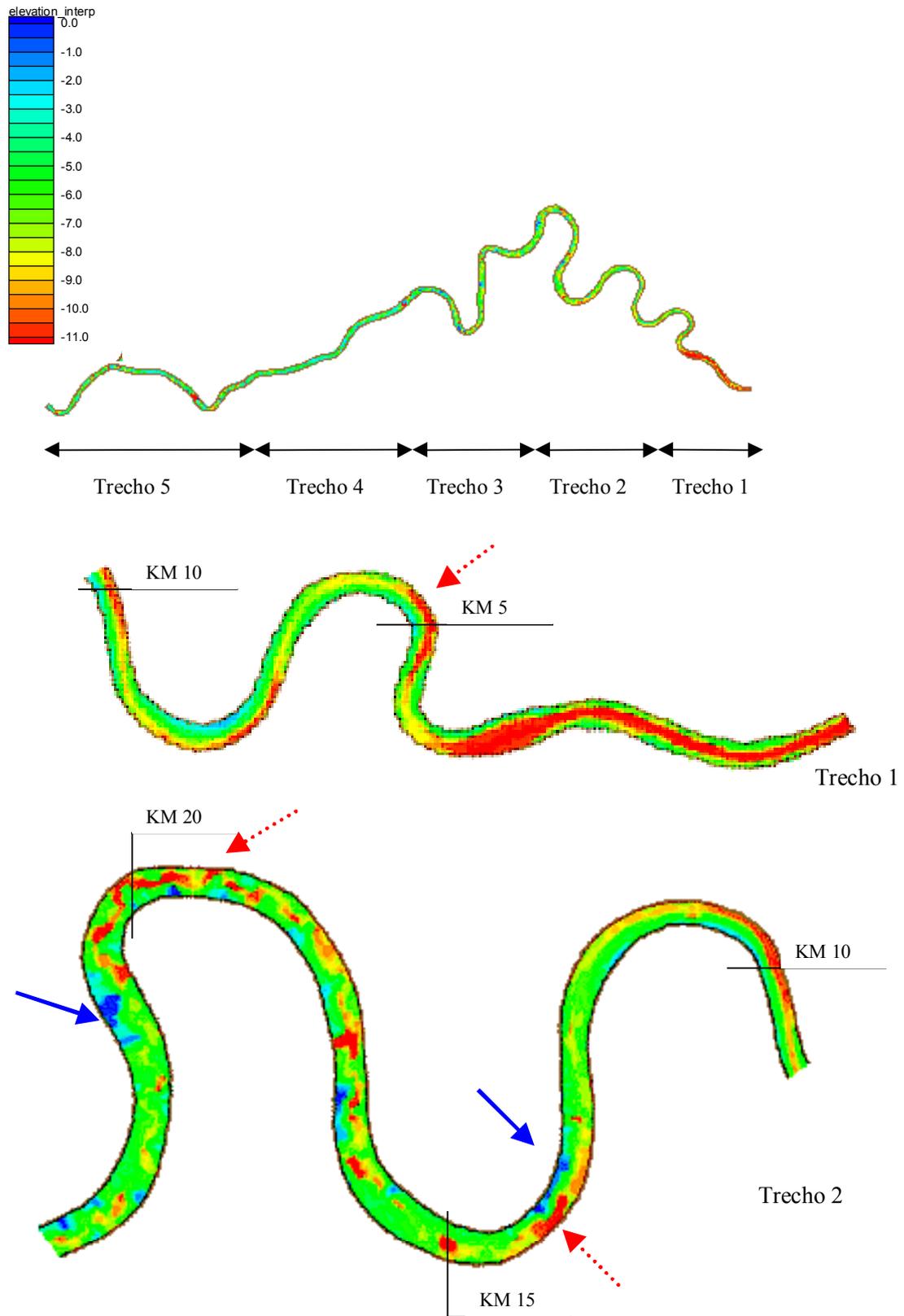


Figura 3 - Reconstituição da maré prevista para o Porto de Itajaí do mês de Agosto/99 pela DHN. Base de dados utilizada para previsão referente ao período de 31/03/1960 a 22/03/1961.

Fonte: Tábua de Marés - DHN

O estuário é relativamente estreito, com a largura variando de 200 a 300 m. Dados batimétricos, cedidos por Schettini (comunicação pessoal), obtidos através de levantamentos recentes realizados em um trecho de cerca de 50 km a partir da foz, permitiram avaliar a topografia de fundo do estuário. Os registros batimétricos apresentam maior densidade de dados nos primeiros 13 quilômetros e com um espaçamento maior, de cerca de 300 m, no trecho restante. A representação gráfica de todo o trecho levantado, bem como, de cada trecho visto em detalhe encontra-se nas figuras 4 (a) e (b). Pode-se notar no trecho 1 a presença do canal de navegação até o quilômetro 3,5 da foz, onde se localiza o porto de Itajaí com profundidades superiores a 10 m e que é mantido através de constantes dragagens. Nos outros trechos observam-se regiões com profundidades superiores a 10 m e também com baixios (soleiras), sendo que as principais soleiras, por exemplo, nos quilômetros 21, 26, 31, ~37 e ~47 e as principais depressões nos quilômetros 14, ~19, 24, 33 e 50 encontram-se assinaladas nas figuras 4 (a) e (b). As profundidades máxima e média nas seções transversais foram obtidas a cada 1000 m e estão apresentadas em perfis longitudinais na figura 5. Pelo talvegue observa-se a presença de fortes depressões acompanhadas de soleiras. A topografia de fundo apresenta profundidade média em torno de 9 m, com depressões que chegam a alcançar 14 m de profundidade e soleiras que, no talvegue, chegam a 3 m de profundidade.

(a)



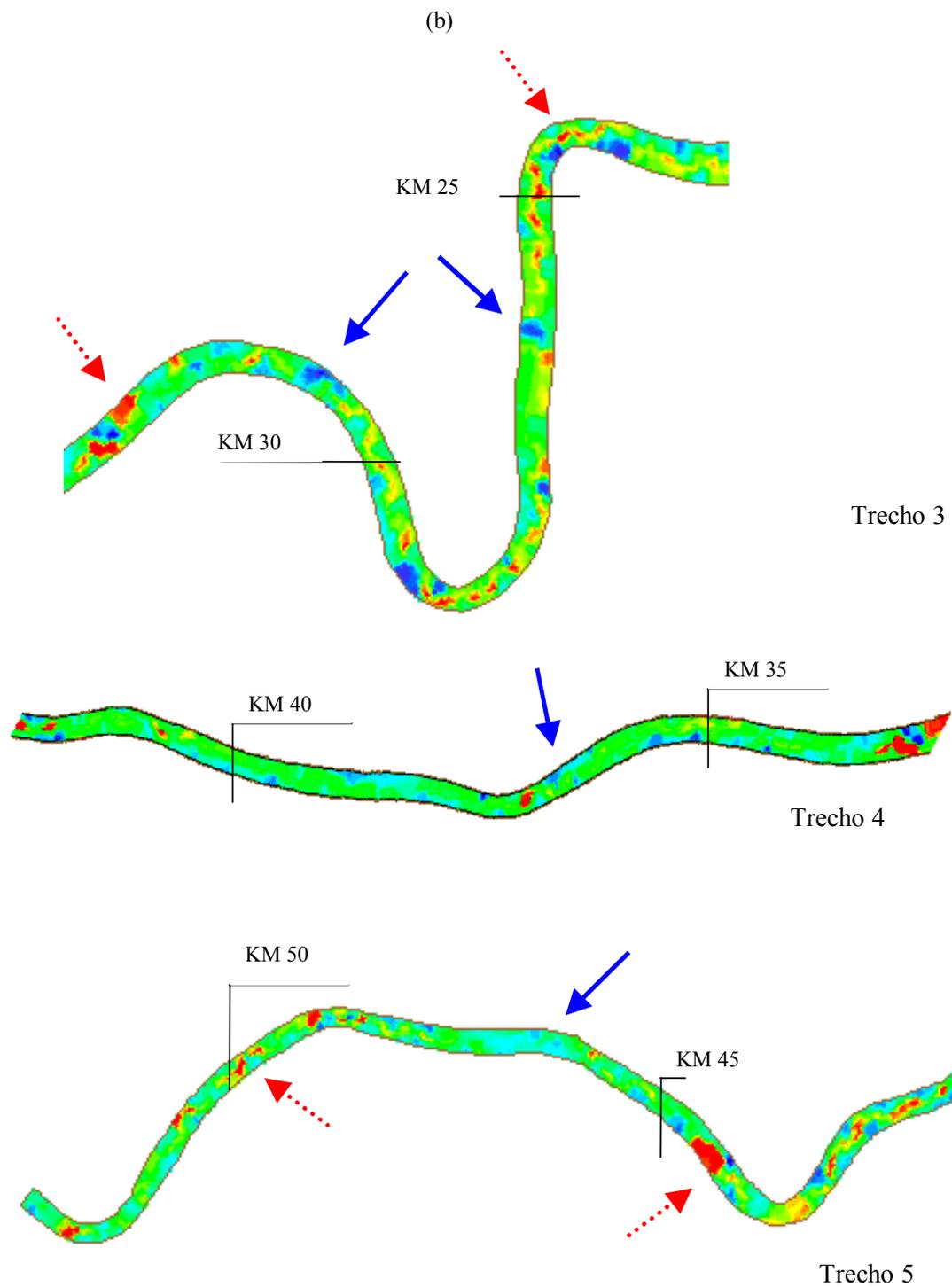


Figura 4 - Representação em planta da batimetria do estuário do rio Itajaí-Açu. Encontram-se representadas em (a) todo o trecho levantado e em detalhe os trechos 1 e 2. (b) em detalhe os trechos 3, 4 e 5. As principais depressões (setas vermelhas em linha pontilhada) e as principais soleiras (setas azuis em linha cheia) estão marcadas na figura assim como referências a cada 5 km.

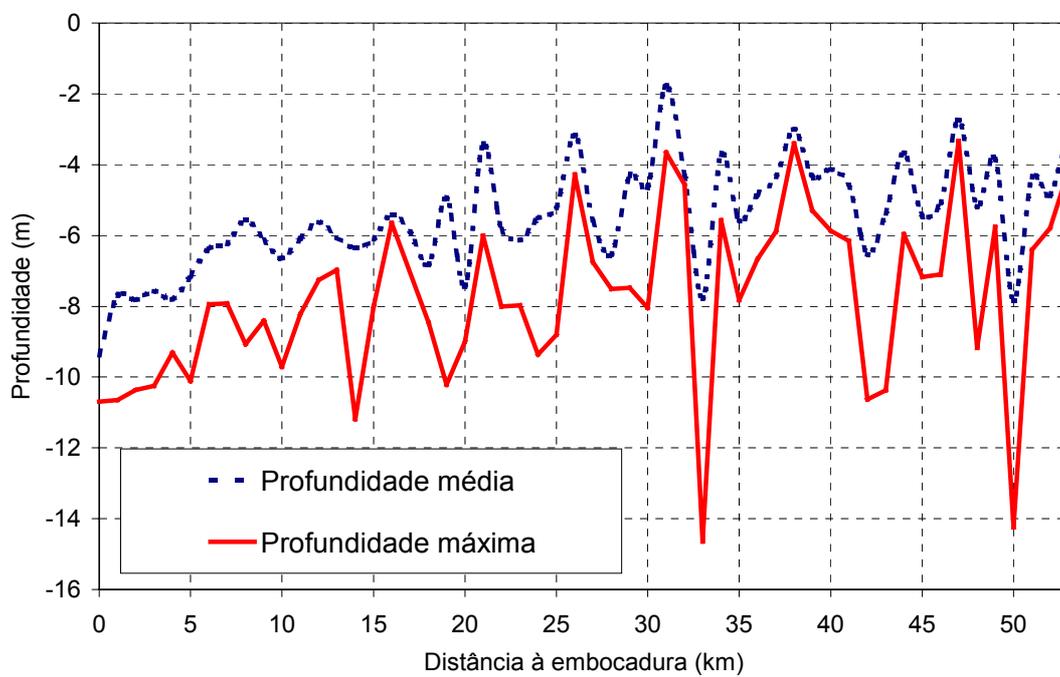


Figura 5 - Perfil longitudinal da topografia de fundo do estuário do rio Itajaí-Açu, para as profundidades média e máxima na seção transversal a cada 1 km.

3 - Metodologia

3.1 – Dados de campo

Os dados utilizados neste trabalho foram cedidos por Schettini (UNIVALI) que realizou campanhas de medições com 47 levantamentos de campo dos perfis verticais e longitudinais de salinidade, temperatura e concentração de sólidos em suspensão, ao longo do estuário, obtidos pelo monitoramento aproximadamente semanal, no período de 27/11/98 a 08/11/99. Os perfis verticais e longitudinais de salinidade e temperatura foram obtidos utilizando-se uma sonda do tipo CTD (*conductivity-temperature-depth*) SensorDataTM SD202, e os perfis verticais de turbidez utilizando-se um turbidímetro de retro-espalhamento ótico SeaPointTM. Os levantamentos foram realizados a partir da foz do estuário até o limite superior da intrusão salina, aproximadamente a cada quilômetro e com duração de cerca de uma hora, produzindo uma visão quase sinóptica do estuário. As coletas foram realizadas, na maior parte das vezes, nas mesmas seções além de terem procurado se posicionar sobre o talvegue (Schettini, comunicação pessoal). Após a coleta, os perfis foram reduzidos na vertical a cada 0,5 m. Uma descrição mais completa sobre a aquisição dos dados pode ser encontrado em SCHETTINI (2001). A distribuição temporal dos dados permitiu investigar o comportamento da cunha salina de acordo com a variação da vazão fluvial e da amplitude de maré, no presente trabalho. Entretanto, o fato de a amostragem ter sido realizada em determinado instante da maré não possibilitou avaliar a variação da cunha salina dentro de um ciclo de maré.

A fim de se investigar o papel da vazão fluvial e da maré sobre a intrusão salina no estuário, os dados foram tratados conforme descrito a seguir. A vazão fluvial foi determinada com base nas informações disponibilizadas pela ANEEL, da estação limnimétrica de Indaial, e por Schettini (comunicação pessoal). As vazões, nos horários em que os dados de salinidade foram coletados, foram obtidas interpolando-se linearmente entre os valores de medição diários de vazão disponibilizados. Quanto ao instante de maré, os levantamentos foram classificados em após a baixamar e após a preamar, instantes que foram determinados com base na tábua de marés da DHN e o horário em que foi realizado o levantamento de dados. A existência de dados de velocidade, ou ainda, a informação de que a onda de maré se comporta como uma onda estacionária ou progressiva, permitiriam uma melhor avaliação para esta classificação.

Isto se deve ao fato de que o campo de salinidade está associado às correntes e não à variação do nível d'água, com a máxima intrusão salina ocorrendo aproximadamente no final da maré enchente, o que corresponde à preamar para uma onda estacionária e a meia maré para uma onda progressiva, e a mínima intrusão ocorrendo ao final da maré vazante, desta vez na baixamar para a onda estacionária e novamente a meia maré para a onda progressiva (DYER, 1997).

Os dados dos levantamentos de salinidade foram representados em gráficos de contorno bidimensionais utilizando-se o programa Surfer[®] utilizando interpolação linear. Foram analisados 44 do conjunto de 47 levantamentos realizados uma vez que três deles apresentaram vazões superiores a 800 m³/s e não foi detectada presença de sal no estuário para estas vazões. De forma resumida, a tabela abaixo apresenta a variabilidade das amostras coletadas classificadas de acordo com a maré, classes de vazão e instante de maré.

Tabela 1 – Distribuição das amostras coletadas de acordo com a maré, vazão fluvial e instante de maré.

		Vazão (m ³ /s)			Instante de Maré	
		Q < 200	200 < Q < 400	Q > 400	Após preamar	Após baixamar
Maré	Quadratura	13	7	2	13	9
	Sizígia	10	11	1	5	17

3.2 – Modelos matemático e numérico

3.2.1 – Modelo matemático

As equações hidrodinâmicas e de transporte para modelos bidimensionais integrados lateralmente são baseadas nos princípios da conservação de massa e de quantidade de movimento e sua obtenção, a partir das equações de Navier-Stokes, continuidade e transporte de sal, pode ser encontrada, por exemplo, em PAIVA (1992). Em um sistema cartesiano de coordenadas, com origem na embocadura do estuário, o eixo x direcionado para montante e o eixo z direcionado para cima as equações governantes incluem:

- equação da continuidade integrada lateralmente:

$$\frac{\partial \bar{u}B}{\partial x} + \frac{\partial \bar{w}B}{\partial z} = 0$$

- equação da continuidade integrada na seção transversal, combinada com as condições de contorno cinemáticas no fundo e superfície livre:

$$\frac{\partial B\bar{\eta}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} \bar{u}B dz = 0$$

- equação de quantidade de movimento na direção x:

$$\frac{\partial \bar{u}B}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}uB}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}wB}{\partial z} + gB \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0} gB \frac{\partial}{\partial x} \left(\int_z^0 \bar{\rho} dz \right) + k\bar{u}|\bar{u}| - \frac{\partial}{\partial x} \left(BA_H \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(BA_V \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) = 0$$

- equação de transporte de sal:

$$\frac{\partial \bar{s}B}{\partial t} + \frac{\partial \bar{s}uB}{\partial x} + \frac{\partial \bar{s}wB}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left(BK_H \frac{\partial \bar{s}}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(BK_V \frac{\partial \bar{s}}{\partial z} \right) = 0$$

- equação de estado:

$$\bar{\rho} = \rho_0 (\alpha + \beta \bar{s})$$

Vale ressaltar que foram consideradas a aproximação hidrostática (em que o peso do fluido é balanceado pela pressão e as acelerações verticais podem ser desprezadas) e a aproximação de Boussinesq (em que as diferenças de densidade são negligenciadas, exceto no termo de gravidade).

3.2.1.1 - Coeficientes de mistura turbulenta

Os coeficientes de mistura turbulenta horizontal A_H e K_H são considerados constantes, sua permanência no modelo se deve mais por razões de estabilidade numérica. Resultados preliminares realizados por PAIVA (1992) e PAIVA e ROSMANN (1993) mostram pouca alteração dos padrões de estratificação e circulação resultantes em função da variação destes coeficientes em até duas ordens de grandeza.

Já os coeficientes de mistura turbulenta verticais são afetados pela estratificação vertical, e não podem ser considerados constantes. A mistura vertical de massa e quantidade de movimento são associadas à estabilidade da coluna d'água através do número de Richardson, que relaciona as forças estabilizantes, representadas pela estratificação de densidade, aos fatores desestabilizantes representados pelo cisalhamento vertical de velocidade longitudinal (DYER, 1997).

$$R_i = \frac{-g \frac{\partial \rho}{\partial z}}{\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2}$$

É utilizada a formulação proposta por BLUMBERG (1975), e apresentada abaixo, em que os coeficientes A_v e K_v são dependentes do número de Richardson local. Nesta formulação, se o número de Richardson local é menor que um número de Richardson crítico estabelecido, os coeficientes são calculados em função da profundidade local, do ponto de cálculo, do parâmetro de calibração kl e do

cialhamento local. Caso o número de Richardson local ultrapasse este valor crítico os coeficientes são considerados nulos, e não há mistura vertical.

$$\left. \begin{aligned}
 K_V &= \left\{ \left(k_1^2 z^2 \left(1 + \frac{z}{h} \right)^2 \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| \right) \sqrt{1 - \frac{R_i}{R_{ic}}} \right. \\
 A_V &= K_V (1 + R_i)
 \end{aligned} \right\} R_i < R_{ic}$$

$$\left. \begin{aligned}
 K_V &= 0 \\
 A_V &= 0
 \end{aligned} \right\} R_i \geq R_{ic}$$

3.2.1.2 - Condições de Contorno

As condições de contorno na superfície livre são a prescrição dos fluxos de massa, sal e quantidade de movimento nulos. Neste estudo não foram consideradas tensões de vento na superfície livre. Os fluxos de massa e de sal são nulos também no fundo. A tensão de fundo, que leva em conta a resistência pelo atrito sobre o escoamento, é calculada por uma lei quadrática que é dada pela expressão abaixo:

$$\tau_F = k_f \bar{u} |\bar{u}|$$

onde k_f é calculado a partir do coeficiente de Manning (n) e da profundidade local (H), e expresso por:

$$k_f = g \frac{n^2}{H^{\frac{1}{3}}}$$

Na embocadura do canal a elevação de superfície é especificada como função do tempo. A imposição da condição de contorno de sal na fronteira oceânica é um dos

problemas de difícil solução até hoje. HARLEMAN e THATCHER (1974) apresentam uma discussão sobre o assunto, especificamente sobre a modelagem unidimensional de intrusão salina não estacionária. A condição de contorno de salinidade imposta naquele trabalho foi considerada de acordo com a direção do escoamento na embocadura. Durante a enchente a salinidade era tomada igual à oceânica e durante a vazante um balanço de massa era calculado em função das variáveis conhecidas do interior do domínio de modelagem. Ao final da vazante, quando a salinidade existente é menor que a oceânica, a imposição da condição de contorno de sal na fronteira de jusante instantaneamente ao início da enchente não seria fisicamente aceitável, uma vez que representaria a existência de uma corrente ao longo da costa tão forte que “varreria” a pluma do estuário instantaneamente. Foi empregada então uma condição de contorno de sal em que, durante um determinado tempo de transição, a salinidade prescrita seria obtida pela interpolação linear entre a salinidade ao final da vazante e a salinidade do mar. Este tempo de transição é dependente de uma análise das correntes existentes ao longo da costa na embocadura do estuário em estudo. Após este tempo de transição e até o final da enchente a salinidade do mar foi prescrita.

Em modelagem bidimensional, especialmente no caso de estuário estratificados, onde se observam escoamentos em direções opostas na coluna d’água, a imposição da condição de contorno de salinidade em função da direção do escoamento não parece ser a mais apropriada. Em alguns estuários a presença de um escoamento sempre se dirigindo para jusante na camada superior, apesar da variação em magnitude ao longo do ciclo de maré, acarretaria na não imposição da condição de contorno de sal nesta camada. Por outro lado, a imposição do perfil de salinidade do mar em qualquer tempo poderia provocar instabilidades no modelo em razão do forte gradiente de salinidade imposto. Neste modelo adotou-se uma condição de contorno de salinidade relaxada em que a salinidade do mar é prescrita após um tempo de transição T estabelecido. Este tempo foi considerado nas simulações igual a 1 hora. A salinidade no contorno é calculada considerando-se o balanço dos fluxos advectivos e uma parcela que leva em conta a salinidade do modelo e a salinidade observada, determinada em função do tempo de relaxamento, conforme a equação a seguir:

$$\frac{\partial s}{\partial t} = -\frac{\partial su}{\partial x} + \frac{1}{T}(s_{mar} - s)$$

No limite fluvial são especificados a vazão fluvial e fluxo de sal nulo, e a velocidade é determinada em função da vazão. No contorno de montante há ainda a possibilidade de uso ou não de uma condição de radiação para velocidade e salinidade.

3.2.2 – Transformação de coordenadas

O sistema de coordenadas sigma foi primeiramente proposto para previsão meteorológica por PHILIPS (1957). Atualmente este sistema de coordenadas na dimensão vertical tem sido utilizado em diversos modelos numéricos de circulação estuarina e oceânica (BLUMBERG e MELLOR, 1987; FORD et al. 1990; PAIVA, 1992; MARTINS, 1999).

Coordenadas cartesianas não representam de forma suave variações na topografia de fundo. Neste caso o corpo d'água é dividido em camadas de altura constante e o número de níveis verticais varia de acordo com a variação de profundidade, dando ao fundo um formato de degraus (figura 6a). Este tipo de configuração pode gerar turbulência artificial com grandes valores de velocidade vertical e conseqüentemente produzir misturas diapcnais artificiais, dependendo do grau de refinamento da grade numérica (SLORDAL, 1997).

Uma forma de se evitar estes inconvenientes é a utilização de um sistema de coordenadas que acompanhe a topografia de fundo, conhecido como sistema sigma de coordenadas. Neste sistema, a coordenada vertical é normalizada em relação a profundidade local. A coluna d'água é dividida em um mesmo número de níveis em todo o domínio independentemente da profundidade da coluna d'água, possibilitando ainda uma boa representação das regiões mais rasas. As coordenadas de superfície e fundo são então transformadas em coordenadas fixas facilitando a aplicação das condições de contorno no fundo e superfície livre, e de acordo SLORDAL (1997), trazendo uma vantagem adicional quanto ao esforço computacional uma vez que todos

os pontos da grade numérica são mantidos dentro do fluido, conforme pode ser observado nas figuras 6b e 6c.

As equações governantes são transformadas do sistema de coordenadas cartesianas (x, z, t) para o sistema sigma (x', σ, t') através das seguintes expressões:

$$\begin{aligned} x' &= x \\ t' &= t \\ \sigma &= \frac{z - \bar{\eta}(x, t)}{h(x) + \bar{\eta}(x, t)} \end{aligned}$$

Onde $\eta(x, t)$ é a posição da superfície livre e $h(x)$ é a profundidade do fundo. Com isto a coordenada vertical z que varia de η a $-h$ tem sua correspondente coordenada σ variando de 0 a -1 conforme figura 6.

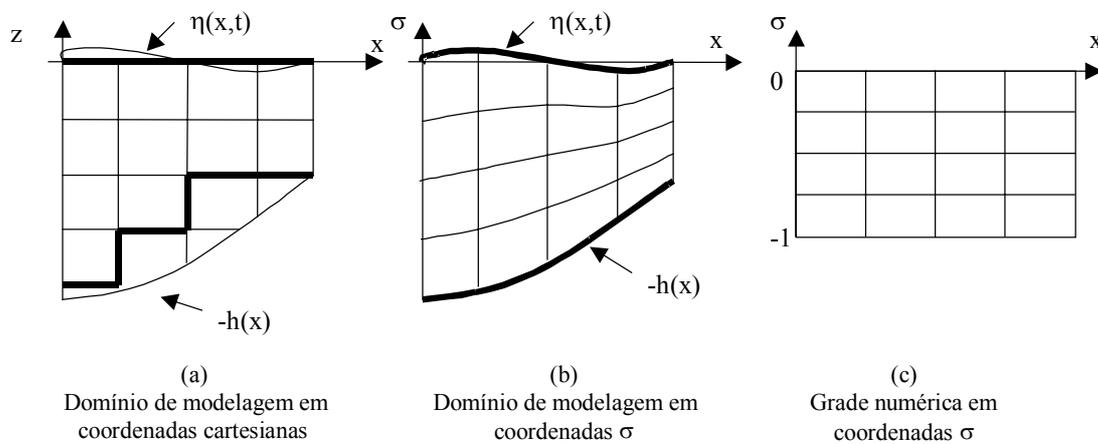


Figura 6 - Figura esquemática mostrando o efeito da transformação de coordenadas sigma sobre o domínio de modelagem e sobre a grade numérica

A transformação de coordenadas baseia-se na aplicação da regra da cadeia e as derivadas longitudinal, vertical e temporal são relacionadas nos dois sistemas de coordenadas conforme abaixo:

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x'} - \frac{1}{H} \left(\frac{\partial \eta}{\partial x'} + \sigma \frac{\partial H}{\partial x'} \right) \frac{\partial}{\partial \sigma}$$

$$\frac{\partial}{\partial z} = \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial \sigma}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t'} - \frac{(1+\sigma)}{H} \frac{\partial \eta}{\partial t'} \frac{\partial}{\partial \sigma}$$

onde $H = h + \eta$ é a profundidade total da coluna d'água. As equações governantes no sistema de coordenadas $x - \sigma - t$ são:

A equação de quantidade de movimento:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{w}' \frac{\partial \bar{u}}{\partial \sigma} = & -\frac{k}{B} \bar{u} |\bar{u}| - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{gH}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x} \left(\int_{\sigma}^0 \bar{\rho} d\sigma \right) - \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial H}{\partial x} \left(\int_{\sigma}^0 \sigma \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} d\sigma \right) \\ & + A_H \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} - \left[\frac{1}{H} \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} + \sigma \frac{\partial H}{\partial x} \right) \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) \right] + \frac{1}{H^2 B} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(B A_V \frac{\partial \bar{u}}{\partial \sigma} \right) \end{aligned}$$

A equação da continuidade bidimensional

$$\frac{\partial H B \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial H B \bar{w}}{\partial \sigma} + \left[B + (1 + \sigma) \frac{\partial B}{\partial x} \right] \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0$$

A equação da continuidade unidimensional,

$$\frac{\partial B \bar{\eta}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-1}^0 \bar{u} B H d\sigma = 0$$

E a equação do transporte de sal,

$$\frac{\partial \bar{s}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{s}}{\partial x} + \bar{w}' \frac{\partial \bar{s}}{\partial \sigma} = K_H \frac{\partial^2 \bar{s}}{\partial x^2} - \left[\frac{1}{H} \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} + \sigma \frac{\partial H}{\partial x} \right) \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{\partial \bar{s}}{\partial x} \right) \right] + \frac{1}{H^2 B} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(B K_V \frac{\partial \bar{s}}{\partial \sigma} \right)$$

Onde w' representa uma pseudo velocidade vertical no novo sistema de coordenadas, ou seja,

$$w' = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{w}{H} - \frac{\sigma u}{H} \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{(1+\sigma)}{H} \frac{d\eta}{dt}$$

Esta relação simplifica a forma de apresentação das equações governantes acima e as condições de contorno impostas na superfície livre e no fundo ($w'=0$ em $\sigma=0$ e $\sigma=-1$).

3.2.2.1 - Problemas associados à transformação de coordenadas.

Há também algumas desvantagens no uso das coordenadas $x-\sigma-t$, dentre elas a inclusão de mais termos às equações (aumentando o esforço computacional), a possibilidade de introdução de mistura artificial diapcinal (STELLING e VAN KESTER, 1994), através dos termos de difusão horizontal próximo a declividades acentuadas ou em regiões com pequenas profundidades e, principalmente, a geração de erros associados ao cálculo do termo do gradiente de pressão baroclínico, que pode produzir escoamentos artificiais. Este erro pode ser relevante em regiões com declividades de fundo pronunciadas e com grandes variações de densidade (SLORDAL, 1997, McCALPIN, 1994, HANEY, 1991, STELLING e VAN KESTER, 1994, BECKMANN e HAIDVOGEL, 1993).

O problema no cálculo dos termos do gradiente de pressão pode ser entendido observando-se a transformação sigma de coordenadas para o termo do gradiente de pressão horizontal abaixo, onde P representa a pressão. Por questões de simplicidade foi utilizada a relação $\sigma = \frac{z}{H}$ na análise do erro. Tem-se, portanto:

$$\left. \frac{\partial P}{\partial x} \right|_z = \left. \frac{\partial P}{\partial x} \right|_\sigma - \frac{\sigma}{H} \frac{\partial H}{\partial x} \frac{\partial P}{\partial \sigma}$$

O gradiente de pressão ao longo de coordenada z é obtido pela adição do termo do gradiente de pressão em coordenada sigma e de um termo de correção hidrostática proveniente da mudança do sistema de coordenadas. Este termo compensa a variação vertical ocorrida em função da mudança de coordenadas, uma vez que a simples mudança do sistema de coordenadas não pode passar a gerar um gradiente de pressão.

SLORDAL (1997) destaca que, uma vez que as superfícies de mesma densidade são praticamente horizontais no oceano, os gradientes de densidade horizontais são relativamente pequenos comparados com os gradientes de densidade verticais. Desta forma, em regiões com declividade do fundo acentuada os gradientes de densidade ao longo de superfícies de sigma constante tornam-se grandes devido à variação vertical de densidade. Com isso, a existência de um pequeno gradiente de pressão baroclínico horizontal é representado pela subtração de dois grandes termos, em função das diferentes densidades associadas a cada nível vertical. Analiticamente esta operação não traz problemas quanto ao cálculo. O erro proveniente do termo do gradiente de pressão origina-se da utilização da equação acima na forma discretizada em modelos numéricos, que provém dos erros de truncamento associados a cada termo, originando assim erros da ordem de grandeza do gradiente de pressão e que podem gerar escoamentos artificiais.

Na figura 7 encontra-se a representação esquemática do cálculo do gradiente de pressão baroclínico ao longo de coordenadas sigma (setas em linha cheia) para um gradiente de pressão baroclínico horizontal (setas em linha tracejada). A ocorrência de declividades de fundo acentuadas, associada a uma variação vertical no campo de densidades, mostra o pequeno gradiente de pressão baroclínico horizontal representado na figura sendo obtido, em coordenadas sigma, através de uma diferença entre pontos de diferentes densidades.

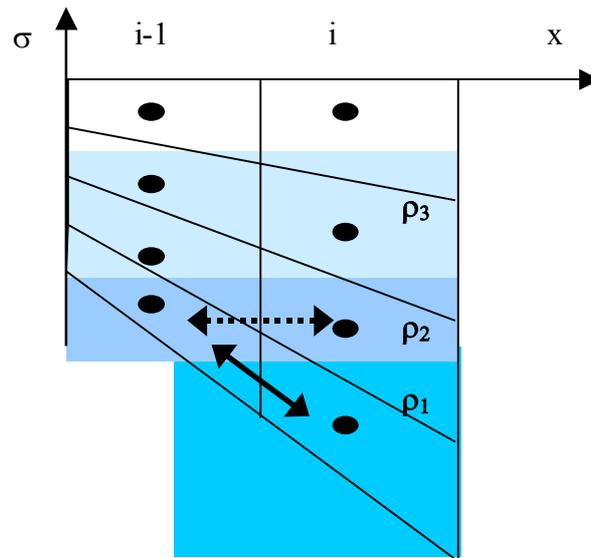


Figura 7 - Figura esquemática mostrando que o cálculo do gradiente de pressão horizontal, que neste exemplo, seria determinado em pontos com mesma densidade (setas com linha pontilhada), ao ser calculado ao longo de coordenadas sigma (setas com linha cheia) em regiões com forte declividade do fundo, seria determinado como o diferencial de dois pontos com densidades diferentes. ($\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$)

HANEY (1991) estabeleceu a noção de “condição de consistência hidrostática” que representaria uma estimativa local da acurácia do cálculo do gradiente de pressão. Sua expressão é dada por:

$$\left| \frac{\sigma}{H} \frac{\partial H}{\partial x} \right| \frac{\Delta x}{\Delta \sigma} < 1$$

Geometricamente, a satisfação deste critério garante que uma superfície σ não intercepte a superfície σ imediatamente superior ou inferior dentro de um intervalo de deslocamento horizontal da grade numérica. Se esta relação não é respeitada então, o esquema numérico é dito não-convergente. No entanto, esta relação é bastante restritiva. Uma solução simples para contornar este problema seria o aumento da discretização horizontal, que pode tornar-se proibitiva em alguns casos, ou ainda a suavização da topografia do fundo de tal forma que atenda a condição de consistência hidrostática. Entretanto, é necessária atenção para que a batimetria suavizada continue representando adequadamente o caso a ser estudado. Diversos autores têm proposto alternativas para

redução deste erro (SLORDAL, 1997, McCALPIN, 1994, HANEY, 1991, STELLING e VAN KESTER, 1994, BECKMANN e HAIDVOGEL, 1993). KLIEM e PIETRZAK (1999) investigaram a magnitude dos erros do gradiente de pressão para simulações em coordenadas sigma e compararam resultados obtidos com as diversas técnicas desenvolvidas nos últimos anos para redução deste erro.

Uma das idéias baseia-se na diminuição do erro de truncamento através do uso de diferenciações de mais alta ordem. Uma vez que McCALPIN (1994), conseguiu melhoramentos na redução do erro de truncamento utilizando diferenças horizontais de quarta ordem nos termos do gradiente de pressão baroclínico, esta técnica foi adotada neste trabalho.

A transformação dos termos difusivos horizontais em coordenadas sigma produz um grande número de termos. Segundo STELLING e VAN KESTER (1994) próximo a declividades acentuadas do fundo ou a planícies alagáveis pela maré (manguezais), onde se têm pequenas profundidades, surgem erros de truncamento na aproximação dos fluxos difusivos horizontais em coordenadas sigma, comparáveis ao erro do gradiente de pressão horizontal. Desta forma pode ocorrer uma difusão artificial ao longo de superfícies sigma. A simulação da estratificação de densidade em regiões próximas a fortes declividades no fundo será então, difícil de ser realizada. A inclusão da completa transformação traria graves problemas numéricos no que diz respeito a acurácia e estabilidade. STELLING e VAN KESTER (1994) apresentam um método que dá uma consistente, estável e monotônica aproximação dos termos de difusão horizontal e pressão baroclínica, até mesmo se a condição de consistência hidrostática é violada. Em geral a maioria dos autores omitem os termos de mais alta ordem uma vez que são termos mais complexos e de alto custo computacional além das incertezas associadas com a escolha dos coeficientes de mistura. Na verdade a difusão horizontal é mais uma necessidade numérica do que uma consideração física, e no presente estudo foram considerados apenas os primeiros termos de correção, que são o 5° e 6° termos da equação da quantidade de movimento e o 1° e 2° termos da equação do transporte de sal do item 3.2.2.

3.2.3 – Modelo Numérico

As reformulações realizadas por PAIVA (comunicação pessoal) no modelo desenvolvido por PAIVA (1992), e que deram origem ao modelo numérico utilizado neste trabalho referem-se a: simplificação do código computacional; modificação do esquema numérico; implementação de diferentes esquemas de discretização para os termos advectivos (centrado, *upwind* e *quickest*); implementação de condição de contorno de velocidade e salinidade com radiação no contorno de montante e melhoria nas condições de contorno de salinidade no contorno marítimo, através da técnica de relaxamento.

Neste trabalho, foram ainda consideradas a utilização de um esquema com discretização de maior ordem para os termos do gradiente de pressão baroclínico e a inclusão de termos de correção na parcela de difusão horizontal da quantidade de movimento e de transporte de sal, em função da transformação de coordenadas sigma, melhor descritas no item 3.2.2.1.

3.2.3.1 – Esquema numérico

As cinco incógnitas do problema (velocidade longitudinal, velocidade vertical, elevação do nível d'água, densidade e salinidade) são determinadas através da resolução das equações da continuidade unidimensional e bidimensional, da quantidade de movimento, de transporte e de estado. As equações governantes transformadas juntamente com as condições de contorno são resolvidas através da técnica de diferenças finitas. Esta técnica consiste na transformação do domínio contínuo (equações diferenciais parciais) em um domínio discreto (equações algébricas) e que podem ser resolvidas pelos métodos implícito ou explícito. No método implícito as equações são resolvidas através de um sistema de equações simultâneas e sua implementação é relativamente mais complexa que o esquema explícito, mas apresenta boas condições de estabilidade. Usualmente, métodos implícitos são computacionalmente mais caros que os métodos explícitos em um passo de tempo, mas

oferecem vantagens no que diz respeito à estabilidade. No método explícito a solução das variáveis em um determinado tempo é obtida em função das variáveis no tempo anterior. Com isso o método apresenta facilidade na sua aplicação, uma vez que é obtido através de um cálculo direto. No entanto, sua estabilidade numérica é dependente das limitações impostas ao passo de tempo pelas condições abaixo.

Condição de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL):

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{\sqrt{gH}}$$

Condição de difusão:

$$\Delta t \leq \frac{1}{4} \frac{(\Delta z)^2}{K_z} \quad \text{e} \quad \Delta t \leq \frac{1}{4} \frac{(\Delta z)^2}{A_z}$$

Em geral, as maiores restrições são impostas pela condição de CFL, mas a condição de difusão pode se mostrar preponderante em estuários rasos (WANG e KRAVITZ, 1980).

Neste modelo é utilizado o esquema de integração explícito *leapfrog* no tempo para os termos advectivos e progressivo no tempo com passo de tempo duplo para os termos de difusão e atrito lateral, e de diferenças centradas para a discretização espacial. A fim de se evitar instabilidades numéricas provocadas pelo esquema *leapfrog*, é utilizado o filtro numérico ASSELIN (1972) a cada passo de tempo.

Para os termos advectivos horizontais de velocidade e salinidade há a possibilidade de uso de três métodos diferentes de discretização. De acordo com ABBOT e BASCO (1989) as características não lineares destes termos geralmente são responsáveis por instabilidades numéricas. Os esquemas disponíveis são portanto: a) o esquema de diferenças centradas que não apresentam difusão artificial mas possuem problemas de instabilidade numérica; b) o esquema *upwind* que apresenta características mais difusivas e estáveis e c) o esquema QUICKEST (*Quadratic*

Upstream Interpolation for Convective Kinematics with Estimated Streaming Terms) que utiliza uma diferença centrada considerando-se uma interpolação quadrática entre os valores de dois pontos nodais adjacentes com o valor do próximo nó de montante. Os esquemas possuem acurácia de ordem igual ou superior a 2. Testes preliminares mostraram que condições de maior estratificação conseguiram ser reproduzidas utilizando-se o esquema de diferenças centradas para o termo advectivo horizontal de salinidade, enquanto que condições de maior mistura foi utilizado o esquema *upwind*.

Uma malha numérica alternada, referenciada na literatura como *staggered grid*, é utilizada (PAIVA, 1992). Extrapolações nos contornos de variáveis ou derivadas foram realizadas de tal forma que mantivessem erros de truncamento de $O(\Delta)^2$. No contorno fluvial há a possibilidade de uso da condição de radiação para a velocidade e salinidade, conforme mencionado no item 3.2.1.3.

3.2.4 – Configuração do modelo

A modelagem baseou-se na tentativa de reproduzir as principais feições do estuário quanto à sua estrutura salina. O estuário foi considerado com uma extensão de 60 km, que é aproximadamente a distância entre as cidades de Itajaí e Blumenau, e apresenta seções transversais retangulares e largura constante de 200 m, que é representativa da largura equivalente considerando-se as profundidades máximas do canal. A representação das feições batimétricas do estuário pelo modelo se faz de grande importância em razão de seu efeito sobre a circulação estuarina. Foi considerado o espaçamento horizontal entre seções de 1000 m para todas as simulações, representando assim de forma adequada as variações batimétricas. Para a discretização da coluna d'água foram considerados 10 níveis verticais. Foi utilizado um passo de tempo de 20 s para todas as simulações, representando um número de Courant de 0,25, sendo o critério de estabilidade para malha alternada de 0,5. Com relação ao critério de difusão este passo de tempo representou um valor da ordem de 10^{-2} , sendo o limite máximo de 0,25.

Dentre os parâmetros de calibração do modelo encontram-se os parâmetros de atrito no fundo e lateral, bem como os coeficientes de mistura turbulentos. Os coeficientes de atrito no fundo e lateral foram considerados constantes ao longo do estuário, e foram ajustados de forma a reproduzir os perfis de salinidade observados. Os valores do coeficiente de Manning e de atrito lateral apresentaram-se com valores superiores aos usualmente utilizados na literatura, com ambos os valores iguais a 0,05. Os coeficientes de difusão e viscosidade turbulentos horizontais foram considerados constantes com valores iguais a 0,04 m²/s uma vez que sua variabilidade mostrou pouca influência nos resultados.

Os coeficientes de difusão e viscosidade turbulentos verticais apresentam-se variáveis de acordo com o nível de estratificação e foram calculados na forma descrita no item 3.2.1.1 levando-se em consideração o número de Richardson local (R_i). Quando R_i ultrapassa o número de Richardson crítico, a mistura cessa. BLUMBERG (1975) sugere o valor de $R_{ic} = 10$ para um estuário que se apresenta parcialmente misturado, mas no caso do estuário do rio Itajaí-Açu este valor não reproduziu o padrão de estratificação observado nos dados. Com a realização de testes preliminares, as condições de maior estratificação presente nos dados conseguiram ser reproduzidas utilizando-se o valor de R_{ic} igual a 2. As condições de maior mistura observadas no entanto, exigiram um valor mais alto que foi conseguido com R_{ic} igual a 5. A utilização de valores superiores a 5 (até 10 nos testes realizados) mostraram pouca alteração nos resultados.

Quanto à prescrição das condições de contorno, na extremidade de montante foi considerada uma vazão constante na maior parte das simulações. Vale ressaltar que não foram consideradas contribuições laterais de vazão neste trabalho. Já a condição de contorno de montante de salinidade foi considerada como fluxo nulo. A condição de radiação no contorno de montante não foi utilizada uma vez que, segundo SCHETTINI (2001), oscilações devidas à onda de maré são percebidas somente até a cidade de Blumenau, sugerindo a não propagação da onda de maré além deste ponto.

A condição de contorno de jusante foi prescrita como elevação na foz do estuário por uma onda de maré de apenas uma componente, com período de 12 h e amplitude variável de acordo com maré a ser modelada (sizígia ou quadratura). Foram

considerados os valores de amplitude de 0,1 m em quadratura e 0,4 m em sizígia, estes valores referem-se ao valor médio de todas amplitudes observadas nos dados coletados em quadratura e sizígia, respectivamente. A utilização de uma onda monocromática na embocadura foi adotado, uma vez o objetivo deste trabalho foi realizar um estudo do efeito da amplitude de maré sobre a estrutura salina do estuário, focando nos processos relevantes, e não houve a intenção de calibrar o modelo numérico para as situações existentes no estuário. A salinidade foi prescrita conforme mencionado no item 3.2.1.3 com a condição de contorno de salinidade relaxada. Os perfis de salinidade impostos na fronteira foram estabelecidos com base nas condições observadas nos dados e estão apresentados na figura 8 de acordo com a maré a ser modelada (sizígia ou quadratura).

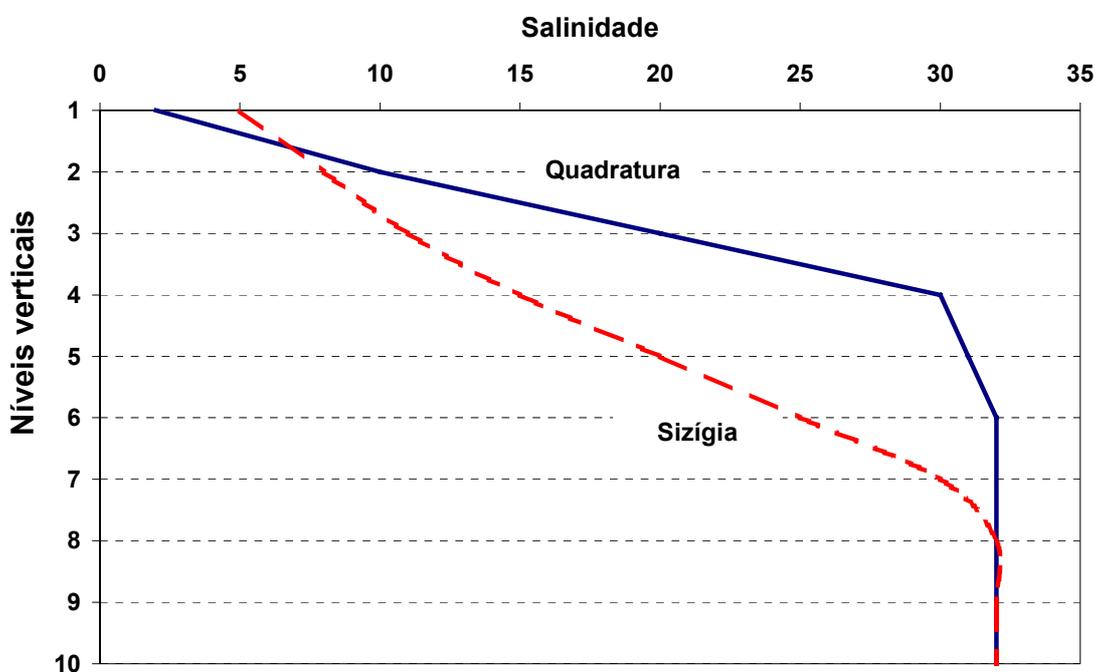


Figura 8 - Perfis de salinidade impostos como condição de contorno na extremidade de jusante do modelo numérico, de acordo com a maré, sizígia (linha pontilhada) ou quadratura (linha cheia).

Quanto às condições iniciais foram adotados valores nulos para velocidade horizontal, velocidade vertical e elevação. A convergência do modelo em relação a hidrodinâmica ocorreu dentro do primeiro ciclo de simulação. Foi adotado como condição inicial de salinidade o perfil considerado na condição de contorno de jusante de sal. A estabilização do modelo quanto a salinidade ocorreu em torno do 10º ciclo de simulação. Todos os experimentos foram realizados considerando-se 20 ciclos de maré

para a simulação, com exceção do experimento descrito no item 4.2.1 com vazão variável onde foram considerados 30 ciclos. O tempo de processamento para cada experimento foi em torno de 5 minutos em um computador AMD Athlon 1.2 GHz com 512 MB de memória RAM.

Os resultados de salinidade da modelagem foram convertidos para coordenadas cartesianas utilizando-se o programa MATLAB[®] e representados em gráficos de contorno bidimensionais utilizando-se o programa Surfer[®], com interpolação linear.

4 – Resultados

Com o objetivo de avaliar a influência da maré na caracterização do padrão salino do estuário e a influência da batimetria sobre o deslocamento da cunha, foram analisados os dados de salinidade descritos no item 3.1 e realizados alguns experimentos numéricos com o modelo descrito no item 3.2.

A modelagem baseou-se na tentativa de reproduzir as principais feições dos padrões salinos do estuário do rio Itajaí-Açu, para ser utilizada como ferramenta de investigação de fenômenos físicos. Vale ressaltar que não houve a intenção de calibração do modelo de forma a reproduzir exatamente o comportamento observado nos dados uma vez que não se dispunham de informações sobre a hidrodinâmica do estuário.

A influência da maré e da batimetria são analisadas separadamente nos itens 4.1 e 4.2, respectivamente.

4.1 – A influência da maré

4.1.1 - Análise dos dados de campo

De forma preliminar, a fim de avaliar os fatores preponderantes sobre o padrão de estratificação do estuário do rio Itajaí-Açu, foi calculado um índice de estratificação, representado por um número adimensional que é dado pela razão entre a vazão fluvial em um ciclo de maré e o prisma de maré, ou seja: $I_{est} = \frac{R.T}{P}$, onde R é a vazão fluvial, T é o período da onda de maré e P é o prisma de maré, que pode ser aproximado pela amplitude média de maré vezes a área em planta do estuário. Determinando-se este índice para uma situação de vazão fluvial média e para duas situações de maré, sizígia e quadratura tem-se: R = 228 m³/s, T = 43200 s e P = 2.2 10⁶ m³ para uma amplitude de 0,2 m e P = 6.6 10⁶ m³ para uma amplitude de 0,6 m, ou seja, tem-se: $I_{est}^{Quad} = 4,4$ e $I_{est}^{Siz} = 1,5$, respectivamente para uma maré média em quadratura e em sizígia. Os valores

obtidos, superiores a unidade, seriam indicativos de um comportamento altamente estratificado de acordo com DYER (1997), inclusive para as situações de maiores amplitudes de maré em sizígia. No entanto, através de uma análise qualitativa dos perfis de salinidade medidos ao longo do estuário do rio Itajaí-Açu podem se observar padrões salinos diferenciados para as marés de sizígia e quadratura. As figuras 9 e 10 apresentam exemplos de perfis de salinidade em maré de sizígia e quadratura, caracterizando condições de mistura e estratificação, respectivamente. Os perfis foram selecionados por apresentarem vazões similares, da ordem de 140 m³/s, e representarem as condições observadas na maior parte dos registros. Apesar dos perfis terem sido obtidos com um intervalo de uma semana entre um e outro e da similaridade nas vazões, observam-se padrões salinos bem diferenciados, além de uma diferença no alcance da intrusão salina de cerca de 6 quilômetros. Estes fatos são indicativos do efeito da maré sobre o padrão salino do estuário. Em geral, durante a maré de quadratura o estuário apresenta-se de forma estratificada. Por outro lado, os perfis obtidos durante a maré de sizígia apresentam características de um estuário parcialmente misturado em cerca de 80% dos registros.

A fim de caracterizar o padrão de estratificação para diferentes características de maré foram calculados os gradientes máximos de salinidade na vertical $\partial s / \partial z|_{\max}$, para todas as seções de coleta ao longo do estuário. Seções onde foram coletadas informações em duas ou menos ocasiões foram descartadas. Calculou-se então, em cada seção de coleta o valor médio e o desvio padrão do gradiente máximo de salinidade. Na figura 11 as informações foram agrupadas de acordo com a ocorrência de maré de sizígia ou quadratura, considerando todas as vazões. Observa-se nesta figura que a média dos perfis de quadratura apresentam os maiores valores de $\partial s / \partial z|_{\max}$, indicativos de uma situação de maior estratificação, enquanto que os de sizígia apresentam valores menores, indicando um estuário mais misturado, demonstrando-se desta forma que a diferença no grau de estratificação varia significativamente em função da maré. No entanto, os desvios padrão das duas curvas se interceptam sugerindo que o grau de estratificação não depende apenas da amplitude da maré.

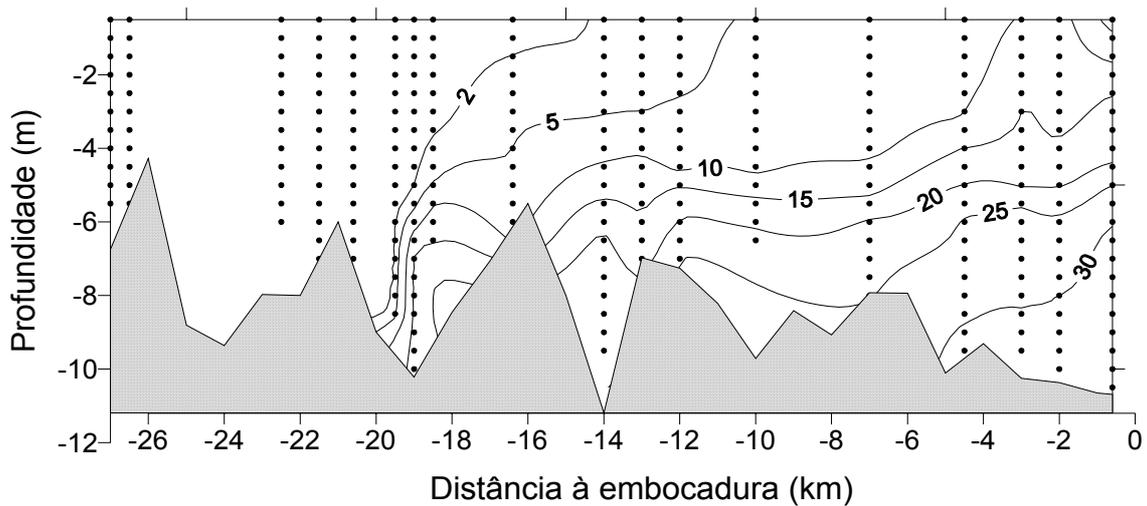


Figura 9 - Perfil longitudinal representado pelas isolinhas de salinidade, obtido em maré de sizígia onde os pontos referem-se aos pontos utilizados na coleta dos dados. O fundo mostrado refere-se a batimetria com profundidades máximas apresentada na figura 5. Dados obtidos no dia 13/08/99 após a baixamar com vazão de $134 \text{ m}^3/\text{s}$.

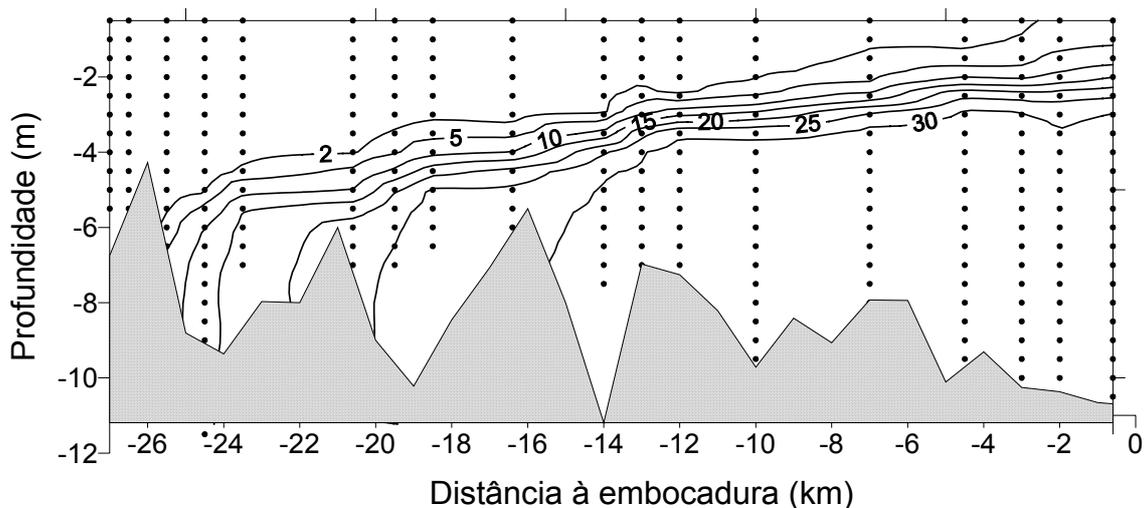


Figura 10 - Perfil longitudinal representado pelas isolinhas de salinidade, obtido em maré de quadratura onde os pontos referem-se aos pontos utilizados na coleta dos dados. O fundo mostrado refere-se a batimetria com profundidades máximas apresentada na figura 5. Dados obtidos no dia 20/08/99 após a preamar com vazão de $141 \text{ m}^3/\text{s}$.

Por outro lado, agrupando-se as informações em diferentes classes de vazão fluvial obtém-se o resultado mostrado na figura 12. Os gradientes máximos de salinidade na vertical ao longo do estuário foram promediados em três classes de vazões: até $200 \text{ m}^3/\text{s}$, de 200 a $400 \text{ m}^3/\text{s}$ e acima de $400 \text{ m}^3/\text{s}$. Para as três curvas

observa-se um comportamento similar, não se verificando a influência da vazão sobre o nível de estratificação. No entanto, percebe-se o efeito da vazão fluvial sobre o alcance da intrusão salina, ou seja, quanto maiores as vazões menores são as distâncias alcançadas.

Os resultados apresentados até o momento confirmam as análises de SCHETTINI (2001), de que a vazão fluvial controla o alcance da intrusão salina no estuário do rio Itajaí-Açu, mas demonstram ainda a importância da maré, em especial das variações entre sizígia e quadratura, sobre o padrão de estratificação no estuário. Apesar de classificado como estuário de micro-maré e da relativa importância da vazão fluvial em relação ao prisma de maré demonstrado pelo índice de estratificação calculado no início deste item, o Itajaí-Açu tem na maré um importante agente de mistura vertical durante as sizígias.

O efeito do alcance da intrusão salina pode ser também avaliado a partir do posicionamento das isolinhas de salinidade de 2 e 30 próximas ao fundo. A localização das isolinhas de salinidade foi determinada com base nos perfis de salinidade, tendo algumas imprecisões devido ao espaçamento da coleta de dados (aproximadamente 1km) e à incerteza na localização do talvegue. Nas figuras 13 e 14 observam-se as posições alcançadas pelas isolinhas de salinidade de 2 e 30 respectivamente, em função da vazão fluvial para as marés de sizígia e quadratura, sendo discriminados ainda os diferentes instantes de maré.

Em geral, para a isolinha de 2 verifica-se uma diminuição da penetração salina com o aumento de vazões. Para vazões superiores a 170 m³/s não se percebe diferenças significativas entre as marés de sizígia ou quadratura. Para as vazões inferiores a 170 m³/s, porém, observa-se um maior avanço da intrusão salina nas marés de quadratura que de sizígia, a menos de um perfil coletado. A diferença no alcance da isolinha de 2 é de aproximadamente 6 km entre os perfis de sizígia e quadratura. Esta diferença está associada aos diferentes graus de estratificação observados, com o maior alcance da intrusão salina ocorrendo na presença de padrões mais estratificados observados em quadratura, e o menor alcance na presença de padrões mais misturados observados em maré de sizígia. Este fato não é observado para as outras vazões, sugerindo uma maior influência da maré no alcance da intrusão salina para as vazões inferiores à média.

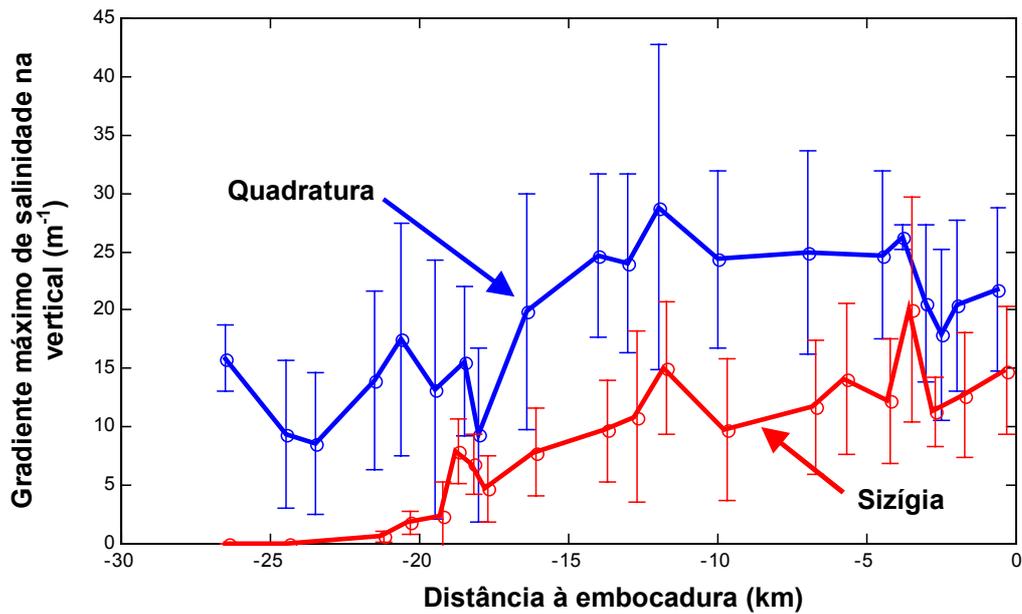


Figura 11 - Média e desvios padrão dos gradientes máximos de salinidade na vertical, em cada seção de coleta ao longo do estuário, para as marés de sizígia e quadratura.

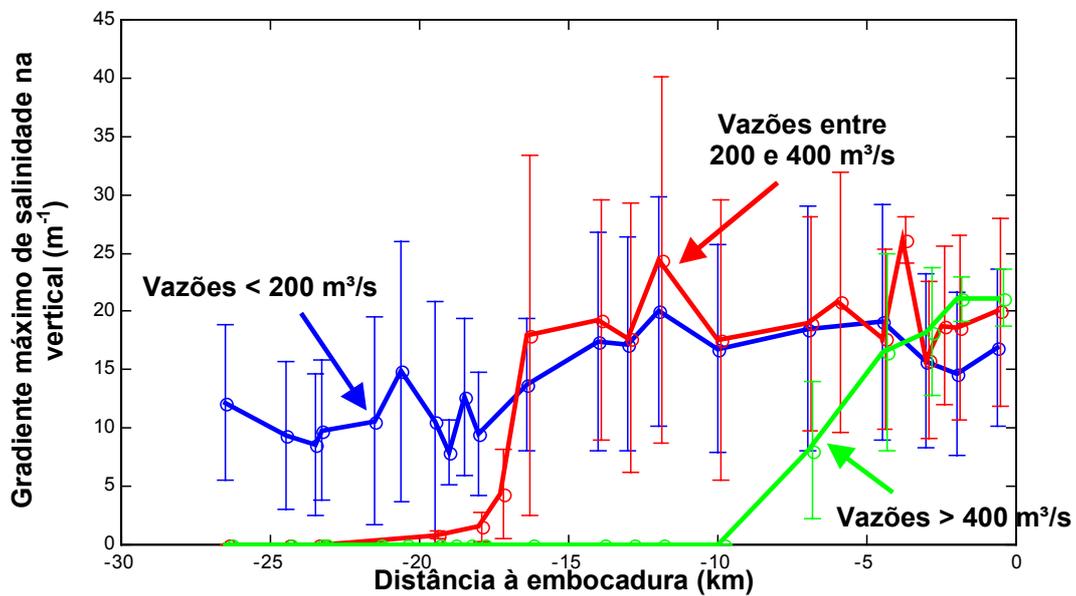


Figura 12 - Média e desvios padrão dos gradientes máximos de salinidade na vertical, em cada seção de coleta ao longo do estuário, para diferentes classes de vazão.

O comportamento do posicionamento da isolinha de 30 para os perfis de quadratura apresenta pouca diferença entre os instantes de maré, com um alcance médio em torno de 14 km da embocadura (figura 14). Este alcance, porém, foi bem superior aos perfis de sizígia obtidos após a baixamar, em torno de 5 km, indicando a maior intrusão de água marinha na presença de um padrão salino estratificado, conforme foi observado nas figuras 9 e 10.

Por outro lado, de acordo com o instante de maré, os perfis de sizígia apresentam uma grande variação no posicionamento da isolinha de 30. As posições obtidas após a preamar em sizígia encontram-se, aproximadamente, 7 quilômetros além das posições alcançadas pelos perfis obtidos após a baixamar. Além disso, as posições ocupadas pelos perfis de sizígia após a preamar são próximas às ocupadas pelos perfis de quadratura. Embora os perfis de sizígia apresentem-se bastante misturados quando comparados aos de quadratura, observam-se três perfis de sizígia com razoável grau de estratificação. Estes perfis diferenciam-se dos demais por terem sido obtidos após a preamar. Esta diferença no grau de estratificação com o instante da maré pode ser observada nos perfis de salinidade apresentados nas figuras 15 e 16, ambos obtidos em maré de sizígia, com vazões próximas e em diferentes instantes de maré.

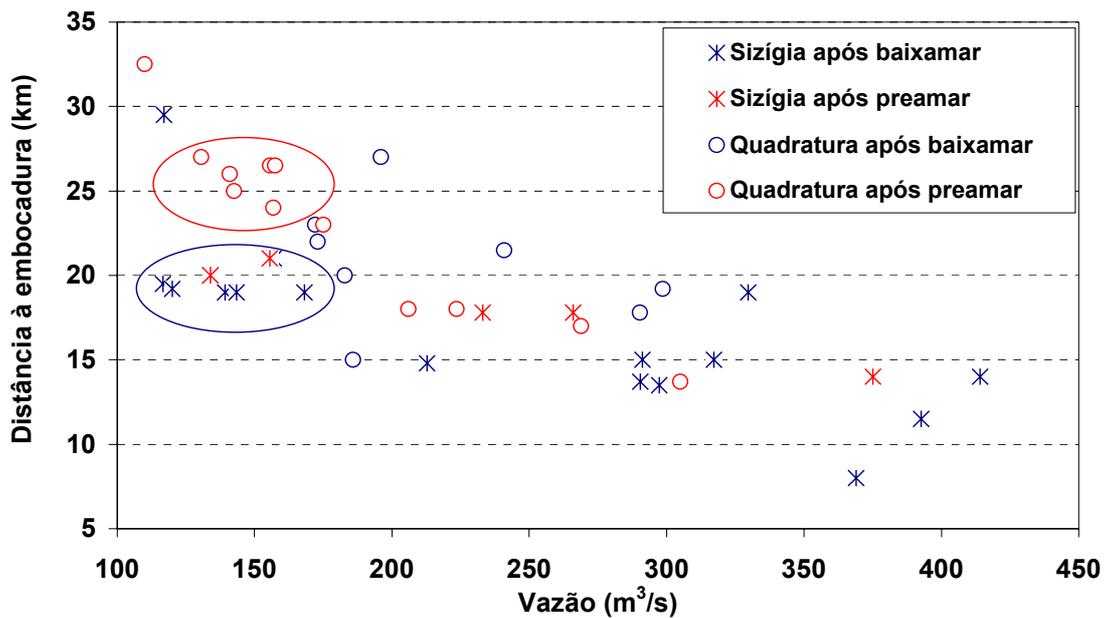


Figura 13 - Posição da isolinha de salinidade de 2 em função da vazão fluvial, para as marés de sizígia e quadratura, sendo discriminados ainda os diferentes instantes de maré.

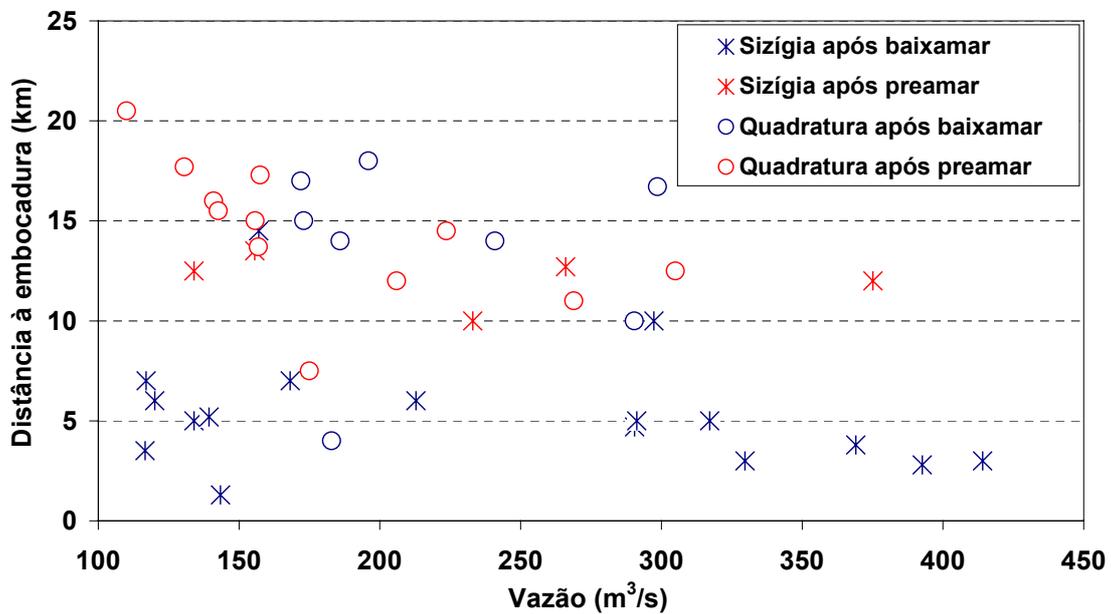


Figura 14 - Posição da isolinha de salinidade de 30 em função da vazão fluvial, para as marés de sizígia e quadratura, sendo discriminados ainda os diferentes instantes de maré.

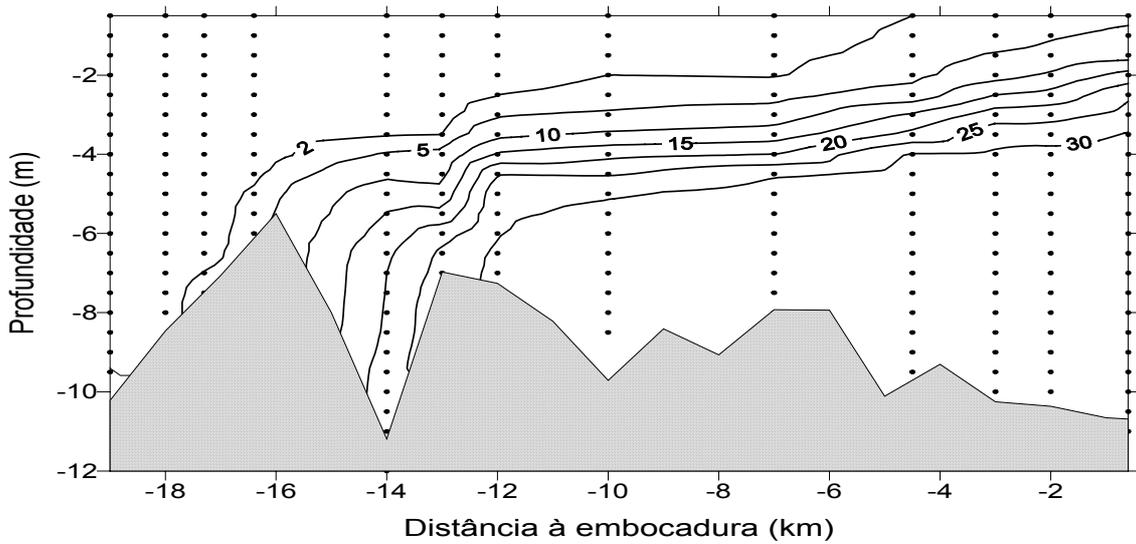


Figura 15 - Perfil de salinidade obtido através de dados coletados em maré de sizígia após a preamar no dia 04/03/99 com vazão de 266 m³/s.

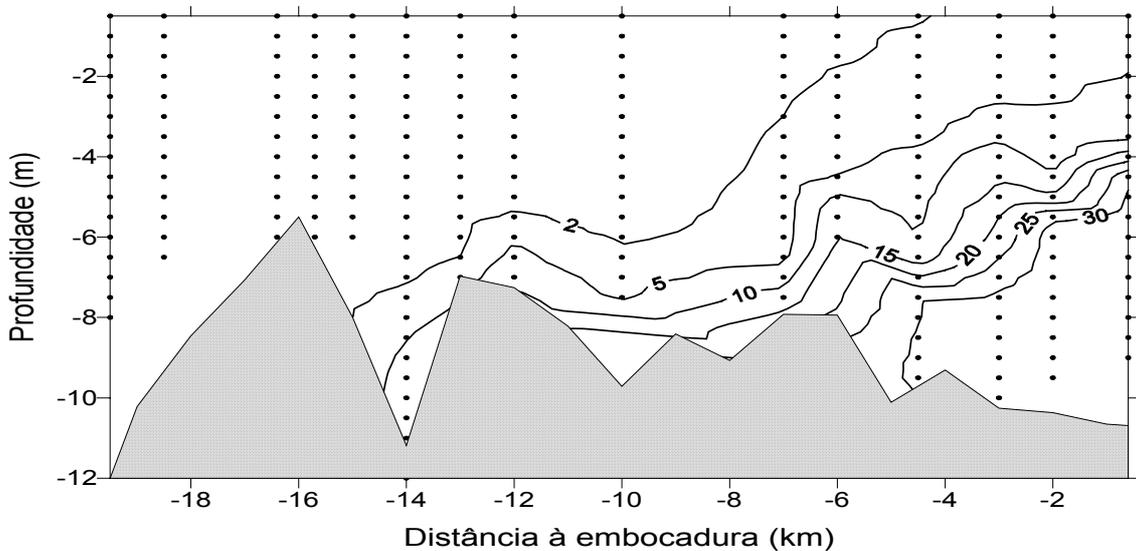


Figura 16 - Perfil de salinidade obtido através de dados coletados em maré de sizígia após a baixamar no dia 22/10/99 com vazão de 291 m³/s.

Um possível mecanismo que explicaria a existência de perfis de sizígia com maior ou menor grau de estratificação é sugerido por JAY e SMITH (1990) que se refere à variação do padrão salino ao longo de um ciclo de maré, em função da diferença nos mecanismos de enchente e vazante. Segundo os autores esta diferença produz variações nos efeitos cisalhantes na coluna d'água e na tensão do fundo que

explica a variação do nível de estratificação em um estuário dentro de um ciclo de maré, conforme pode ser observado na figura 17. A intensificação das velocidades próximas do fundo durante a enchente, em razão da atuação na mesma direção dos gradientes de pressão barotrópico e baroclínico, produzem grandes tensões de atrito no fundo opostas ao escoamento da maré e que geram turbulência e, portanto, intensificando a mistura vertical. Durante a vazante os gradientes de pressão barotrópico e baroclínico possuem direções opostas, diminuindo a forçante da maré no fundo e conseqüentemente a tensão de atrito. Essa diminuição do atrito no fundo associada a intensificação das velocidades na superfície produz um aumento das tensões cisalhantes na coluna d'água (*shear*). A ocorrência desta advecção diferenciada (*straining*) entre as camadas de águas menos densas movendo-se mais rapidamente que as águas mais densas do fundo, em função do escoamento da vazão do rio e do atrito do fundo, promovem aumento da estratificação pela maior diminuição da salinidade da superfície em relação ao fundo (DYER, 1997).

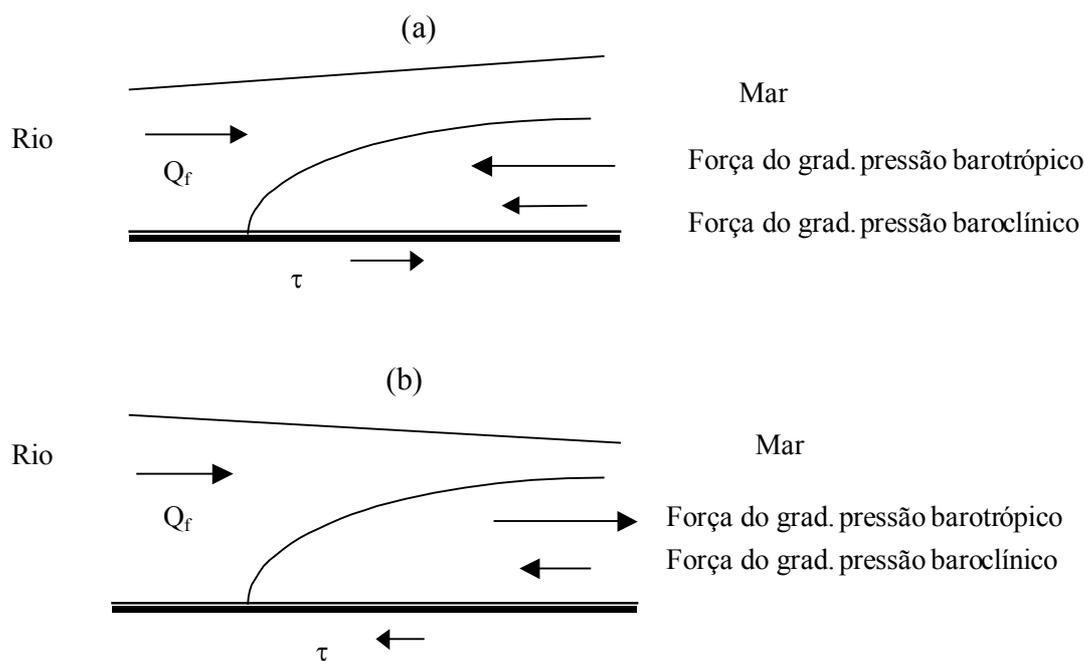


Figura 17 - Variação da tensão do fundo em função dos diferentes mecanismos de enchente e vazante.

Esta variabilidade no nível de estratificação dentro de um ciclo de maré foi observada no estuário do rio Douro (VIEIRA e BORDALO, 2000). Enquanto que na enchente a coluna d'água apresentava-se completamente misturada, na vazante com o

rápido decréscimo de salinidade na superfície a estratificação se desenvolveu. Também em um trecho do estuário do rio Hudson observou-se que, em geral, a estratificação máxima próxima do fundo ocorreu durante o final da vazante e a mínima no final da enchente. A manutenção da estratificação durante a vazante foi atribuída a advecção diferenciada; já na enchente a advecção de água mais densa sobre a menos densa (*overstraining*), produz uma estratificação instável e conseqüentemente, mistura vertical (NEPF e GEYER, 1996).

Já no estuário do rio Fraser, GEYER e FARMER (1989) verificaram que a presença de fortes tensões cisalhantes na coluna d'água durante a vazante associada a constrictões laterais que destruiu a estrutura da cunha salina, desenvolvida na enchente. Esta diferença foi atribuída à transição do escoamento de um regime subcrítico para o supercrítico, de acordo com o número de Froude densimétrico.

A existência de dados de velocidade associados aos dados de salinidade permitiria realizar uma análise mais aprofundada no estuário do rio Itajaí-Açu para explicar a ocorrência de perfis obtidos na maré de sizígia com características de estratificação, a partir da avaliação do número de Richardson durante a vazante. JAY e SMITH (1990) ressaltam o papel da advecção diferenciada possibilitando a geração de altas tensões cisalhantes na interface. Assim, se o número de Richardson encontra-se abaixo do valor crítico, a mistura turbulenta vertical não é eliminada apesar da estratificação. Por outro lado se R_i ultrapassa o valor crítico, para o mesmo nível, a turbulência gerada pelo fundo não consegue penetrar acima deste nível. Neste caso, o amortecimento da turbulência pela estratificação pode permanecer até o final da vazante, inclusive para maiores amplitudes de maré.

O efeito do instante da maré na penetração salina pode ser também observado através da salinidade média no estuário. Os dados de salinidade de cada levantamento foram assim integrados ao longo das seções e divididos pela área referente aos primeiros 30 km do estuário, obtendo-se assim a salinidade média no estuário, apresentados nas figuras 18 e 19 referentes às marés de quadratura e sizígia em função da vazão e de acordo com o instante da maré. Na figura 18, referente à maré de quadratura, observa-se o decréscimo da salinidade média no estuário em função do aumento da vazão, mas não se observa praticamente grandes variações para diferentes

instantes de maré. Em relação à maré de sizígia, verifica-se uma variação na salinidade média em função do instante de maré, conforme figura 19, com os valores obtidos após a preamar superiores em relação aos obtidos após a baixamar. Esta variação da salinidade média em função do instante de maré, para a maré de sizígia, vem reforçar a diferença observada também no posicionamento da isolinha de salinidade de 30.

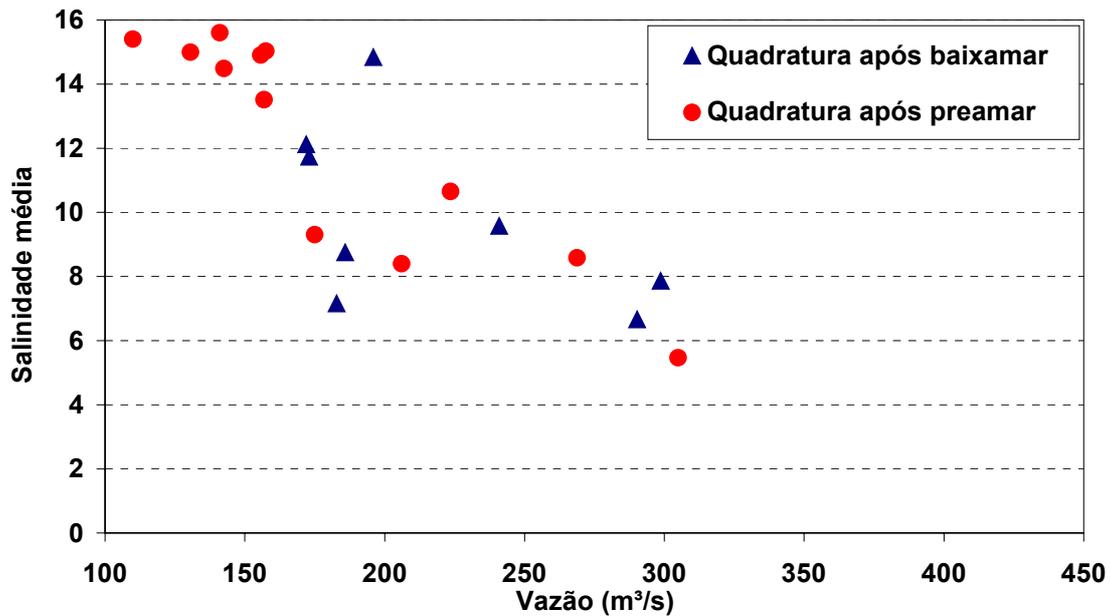


Figura 18 – Salinidade média no estuário para os perfis obtidos em maré de quadratura em função da vazão fluvial e também do instante de maré.

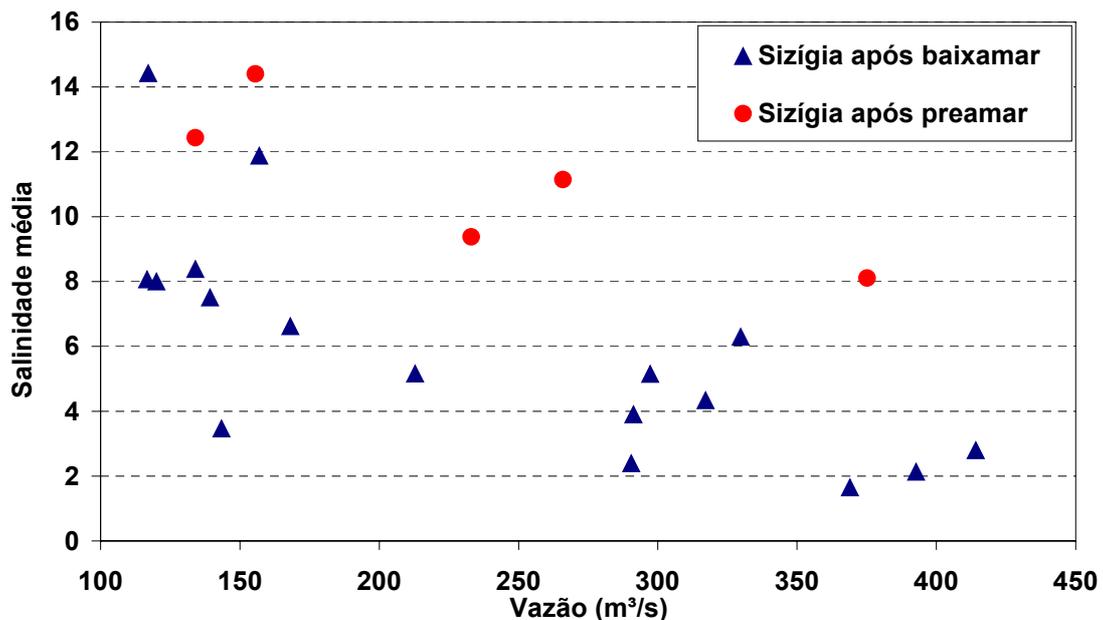


Figura 19 – Salinidade média no estuário para os perfis obtidos em maré de sizígia em função da vazão fluvial e também do instante de maré

4.1.2 - Análise dos resultados numéricos

A variação da salinidade média no estuário ao longo de um ciclo de maré, em função da amplitude da maré e da vazão fluvial, foi também avaliada através da modelagem numérica. As simulações foram realizadas considerando-se: amplitudes de maré de 0,1 m para a maré de quadratura e de 0,4 m para a de sizígia, e vazões de 150 e 300 m³/s. A condição de contorno de salinidade imposta nestas simulações foi a mesma para todos os casos, e refere-se ao perfil de quadratura apresentado na figura 8. Os resultados referentes a salinidade média no estuário ao longo de um ciclo de maré estão apresentados na figura 20. Observa-se que os resultados da modelagem apresentam-se da mesma ordem dos valores observados nos levantamentos. Por exemplo, para a vazão de 150 m³/s a salinidade média observada na quadratura variou entre 13 e 16, valores semelhantes aos obtidos na modelagem. Na sizígia a variação da salinidade média foi maior, de 4 a 14, enquanto que na modelagem foi obtida uma variação de 6 a 11.

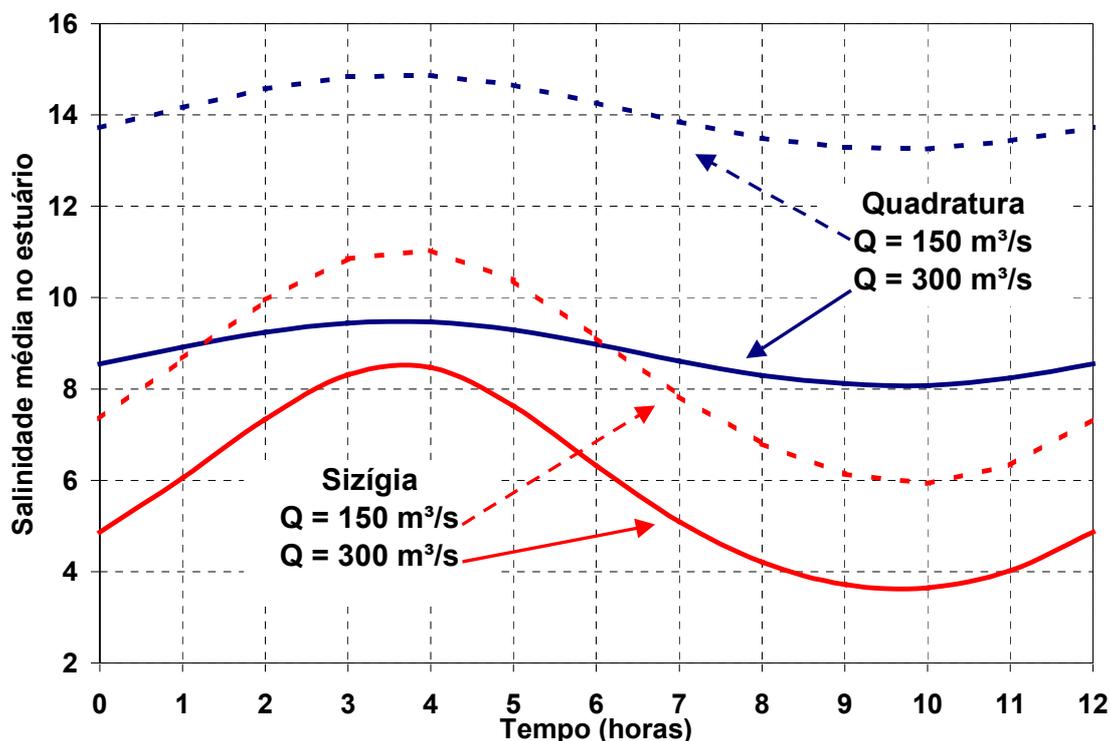


Figura 20 - Variação da salinidade média no estuário ao longo de um ciclo de maré, para diferentes amplitudes de maré sizígia (0,4 m) e quadratura (0,1 m) e duas situações de vazão fluvial (150 e 300 m³/s). Resultados obtidos com modelagem numérica.

Para a maré de quadratura, observa-se também na modelagem uma pequena variação na salinidade média ao longo do ciclo de maré. Já para a maré de sizígia, ocorre uma grande variação da salinidade média no estuário ao longo de um ciclo. Nota-se que a amplitude da curva de salinidade média no estuário para ambas as marés de sizígia e quadratura se mantém independente da vazão fluvial. A vazão fluvial é importante na salinidade média no ciclo, sendo que se observa uma redução mais significativa para a maré de quadratura do que para a maré de sizígia. Este fato é notado, por exemplo, observando-se a figura 20 em torno das horas 3 e 4, quando a diferença na salinidade média de sal entre as marés de sizígia e quadratura para uma vazão de 300 m³/s é de cerca de 1, enquanto que para uma vazão de 150 m³/s é de cerca de 4. Verifica-se assim que a amplitude da curva de variação da salinidade média no estuário em maré de sizígia é da ordem da redução da salinidade média em quadratura pelo efeito da duplicação da vazão fluvial.

A variação da salinidade média em função da maré pode ser explicada em função do grau de estratificação. Com a estratificação, a mistura entre as camadas de diferentes densidades é diminuída. Em condições de pequenas velocidades de maré (originadas das pequenas amplitudes de maré durante a quadratura) a água marinha move-se para dentro do estuário alcançando longas distâncias. A perda de sal ocorre em função da mistura proveniente, por exemplo, da arrebentação das ondas de instabilidade interna que ocorrem na interface das camadas de diferente densidade causando *entrainment*; o sal é então introduzido na camada superior e expulso do estuário devido ao escoamento na camada superior para jusante (DYER, 1997). Com as maiores velocidades de maré em sizígia, a mistura entre as camadas é mais intensa, podendo ocorrer em toda a coluna d'água, em função da turbulência gerada pelo atrito do fundo. Com isso o escoamento residual para jusante da camada superior consegue expulsar uma maior quantidade de sal em um ciclo de maré, explicando a maior quantidade de sal durante a maré de quadratura que de sizígia observada na figura 20.

Este fato pode ter grande importância para a modelagem estuarina. Quando se tem um estuário bem misturado, em que é possível utilizar a modelagem unidimensional para previsão de distribuição longitudinal de salinidade média na seção transversal, observa-se que há uma maior intrusão de sal durante as marés de sizígia que de quadratura (MEDEIROS e VINZON, 2000), em função das maiores velocidades que

ocorrem na sizígia. Tal fato não é observado no Itajaí em função da presença de estratificação. Em grande parte dos perfis de quadratura o estuário apresenta um comportamento estratificado enquanto que os perfis amostrados durante a maré de sizígia apresentam-se parcialmente misturados, resultando em um comportamento diferenciado quanto à salinidade média presente no estuário e dependente do padrão salino existente.

A ocorrência de padrões salinos diferenciados no estuário do rio Itajaí-Açu, em função da maré, consegue ser reproduzido através da modelagem numérica. O efeito da maré, sizígia ou quadratura, é modelado em função da amplitude de maré e as principais feições de cada situação conseguem ser representados. Os cenários escolhidos para modelagem referem-se a uma maré de sizígia e de quadratura, com vazão igual a 140 m³/s em ambos os casos e amplitudes de maré iguais a 0,4 e 0,1 m, respectivamente. A batimetria utilizada refere-se às máximas profundidades apresentadas na figura 5. Estes cenários tentam reproduzir os dados apresentados nas figuras 9 e 10. Encontram-se representados nas figuras 21 e 22 os resultados obtidos com a modelagem em quatro instantes de maré: início da enchente, velocidade máxima na enchente, início da vazante, velocidade máxima da vazante, para as marés de sizígia e quadratura.

O gradiente vertical de salinidade na quadratura apresentou-se menor na modelagem do que o observado nos dados (figura 10), mas, de forma geral, consegue-se uma boa representação das principais feições das sizígias e quadraturas, como a maior estratificação presente nos perfis de quadratura, o padrão mais misturado observado em sizígia e a representação da camada com salinidade igual ou superior a 30. Esta camada apresenta um comprimento em torno de 4 km e uma espessura de 3 m na embocadura em sizígia, e um comprimento de 13 km e uma espessura de aproximadamente 6 m em quadratura, valores similares aos medidos.

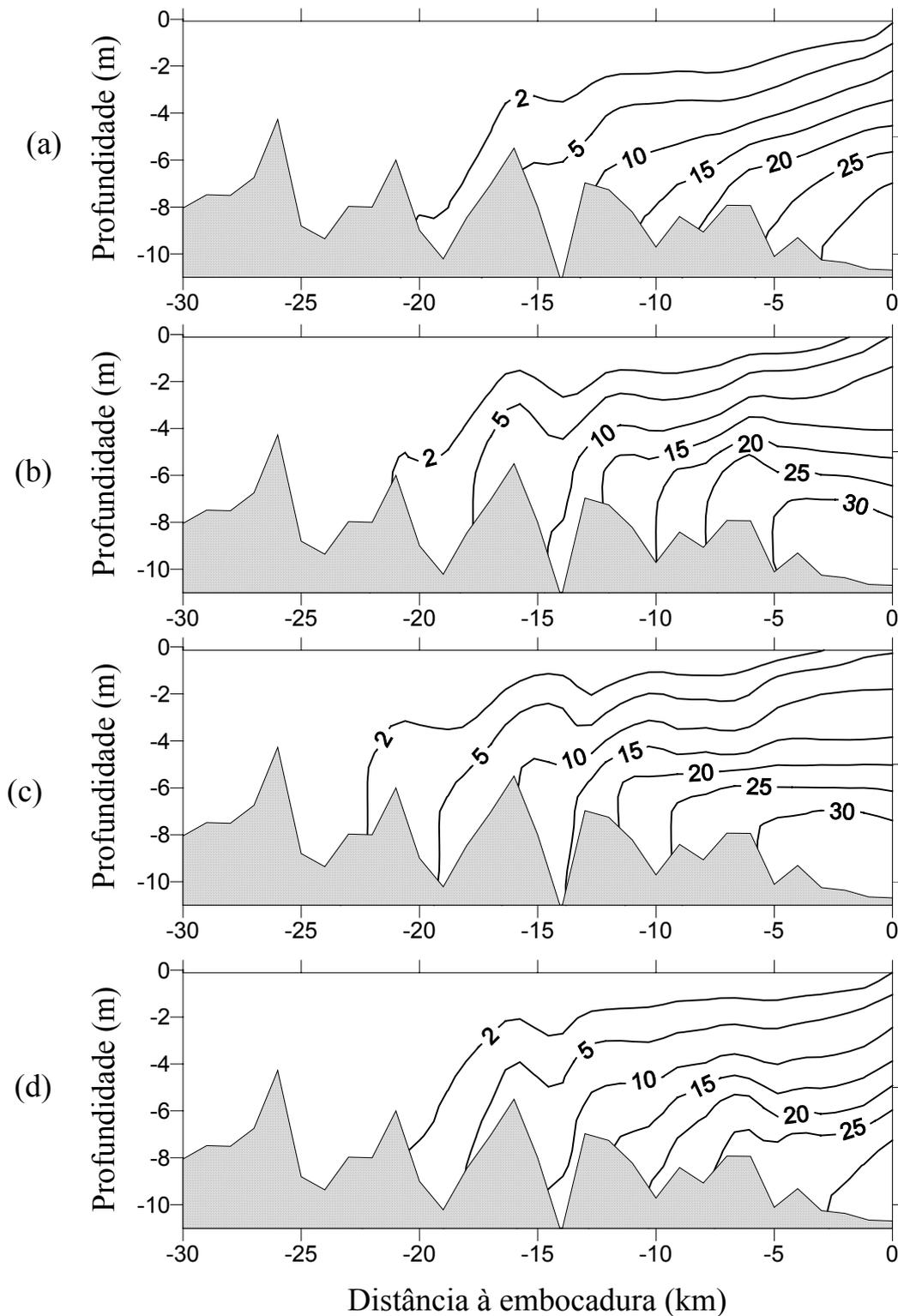


Figura 21 - Perfis de salinidade resultantes da simulação numérica para a maré de sizígia (amplitude = 0,4 m) com vazão de 140 m³/s em quatro instantes de maré: (a) início da enchente, (b) máxima enchente, (c) início da vazante e (d) máxima vazante.

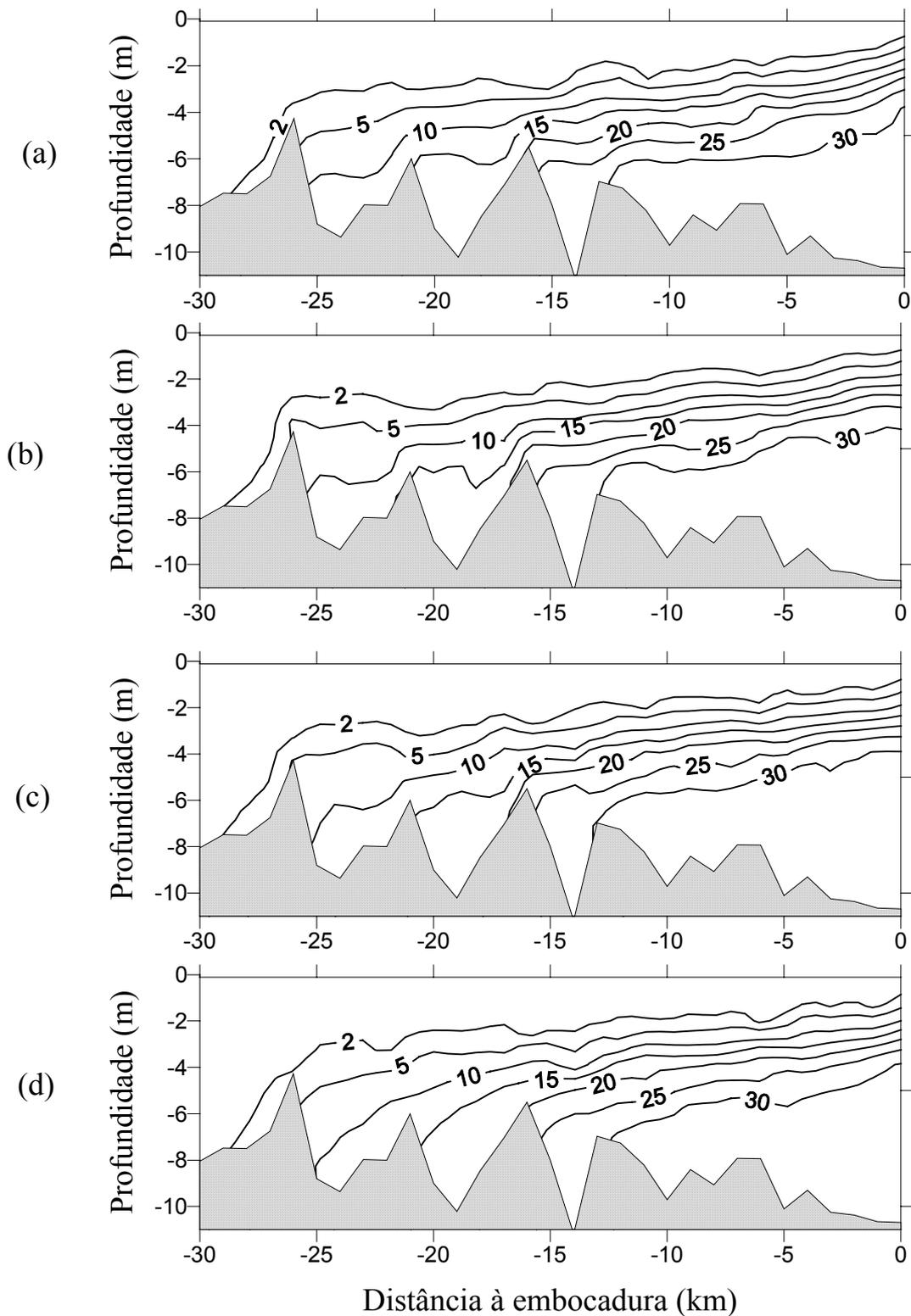


Figura 22 - Perfis de salinidade resultantes da simulação numérica para a maré de quadratura (amplitude = 0,1 m) com vazão de 140 m³/s em quatro instantes de maré: (a) início da enchente, (b) máxima enchente, (c) início da vazante e (d) máxima vazante.

Conforme se observa nas figuras 9 e 10, verifica-se com a modelagem, figuras 21 e 22, uma maior intrusão salina no caso da maré de quadratura que a de sizígia, tanto das isolinhas de salinidade de 2 quanto de 30, demonstrando o efeito da maré sobre a mistura e conseqüentemente sobre o alcance da intrusão salina.

Nos resultados obtidos para a maré de sizígia, figura 21, observam-se perturbações sobre as isolinhas de salinidade localizadas em torno dos quilômetros 14 e 20. Estas perturbações parecem estar associadas às depressões encontradas nestes locais. GEYER e FARMER (1989) ressaltam que mudanças observadas nas elevações da pycnoclina são resultado da movimentação da camada de águas mais densas sobre variações batimétricas. Estas variações são também observadas nos dados referentes à maré de sizígia (figura 9), porém de forma mais discreta nos perfis de quadratura, seja nos dados (figura 10) ou nos resultados da modelagem (figura 22). UNCLES e STEPHENS (1996) também verificam variações, na forma de ondas, nas isolinhas de salinidade presentes nos perfis obtidos no estuário do rio Tweed, e sugerem que estejam relacionadas à topografia, já que ocorrem em regiões com profundas depressões, aspecto que será discutido no item 4.2.

Quanto ao posicionamento das isolinhas de salinidade durante um ciclo de maré, tem-se para a maré de quadratura uma pequena variação das isolinhas de 2 e 30, enquanto que para a maré de sizígia há uma diferença de cerca de 2 km quanto a posição em um ciclo de maré para a isolinha de 2. Isto concorda com as informações sobre os dados para vazões em torno de 140 m³/s, conforme figura 13. No caso da isolinha de salinidade de 30, a modelagem consegue representar um maior deslocamento na maré de sizígia do que em quadratura. No entanto, a diferença de cerca de 3 km obtida com a modelagem é inferior à observada nos dados (figura 14). Tal fato pode estar relacionado à variação do grau de estratificação durante o ciclo de maré, que pode ocorrer na maré de sizígia, e que o modelo não conseguiu reproduzir, talvez em função da falta de calibração do modelo com dados hidrodinâmicos e também de um maior conhecimento da dinâmica da salinidade na extremidade de jusante do estuário para o estabelecimento das condições de contorno.

4.2 – A influência da batimetria

A batimetria pode afetar significativamente a propagação da maré e das águas marinhas em um estuário pela existência de irregularidades na topografia do fundo, retardando a propagação da intrusão salina na presença de soleiras, ou ainda pelo aprisionamento de águas salinas (mais densas) em depressões, inclusive durante a maré vazante. Este poderia ser, além da influência da maré, outro fator que explicaria a grande variabilidade observada em SCHETTINI (2001) em relação ao seu ajuste de dados de alcance da intrusão salina em relação à vazão fluvial.

A fim de se avaliar a influência da batimetria sobre a forma e deslocamento da cunha salina no estuário do Itajaí-Açu foram realizadas inicialmente quatro simulações com as mesmas condições de vazão, amplitude de maré e parâmetros de calibração variando-se apenas a topografia de fundo. As condições de vazão e amplitude de maré referem-se aos valores correspondentes aos dados mostrados na figura 10, ou seja, vazão de $140 \text{ m}^3/\text{s}$ e amplitude de maré igual a $0,1 \text{ m}$. Neste caso, observam-se nos dados uma intrusão salina com cerca de 26 quilômetros de extensão. As quatro simulações realizadas constaram das seguintes situações para o fundo do estuário: (a) fundo plano e horizontal, (b) fundo plano com declividade, (c) batimetria real com profundidades médias na seção transversal (linha de cor azul na figura 5) e (d) batimetria real com máximas profundidades (talvegue) (linha de cor vermelha na figura 5). O modelo foi integrado por 20 ciclos de maré, com o modelo atingindo o equilíbrio após o 10º ciclo. A intrusão salina média por ciclo de maré referente ao último ciclo simulado é apresentada para cada simulação na figura 23 (a), (b), (c) e (d).

Na primeira simulação, em que as profundidades são constantes, a intrusão salina alcançou a extremidade de montante do estuário a 60 km da foz (figura 23-a). A inclusão da declividade na linha de fundo observada (0.0133 %), mas com a manutenção do fundo plano, provoca uma sensível modificação no resultado. Esta modificação tanto é percebida no alcance, que chega a quase 40 km da embocadura, quanto em relação à estrutura salina, onde se verifica a presença de uma cunha salina bem definida (figura 23-b).

A influência da irregularidade do fundo no comportamento da intrusão salina pode ser verificada nas simulações (c) e (d). Na presença de menores profundidades observadas no caso (c) ocorre uma menor penetração da cunha salina, em torno de 23 km (figura 23-c). Em função da pouca irregularidade no fundo, observa-se ainda um forte gradiente horizontal de salinidade na frente da cunha na região próxima do fundo, comparável a simulação do caso (b). No caso (d), experimento que apresenta as maiores profundidades assim como um fundo mais irregular, a cunha estendeu-se até cerca de 28 km da embocadura, extensão comparável à observada nos dados (figura 23-d). É interessante notar que estas irregularidades afetam tanto a extensão da propagação da cunha como também sua forma. O forte gradiente horizontal de salinidade próximo ao fundo observado nas simulações (b) e (c) não é verificado aqui, possivelmente pelo efeito de aprisionamento das isolinhas de salinidade pelas soleiras existentes. A posição da isolinha de 30 foi semelhante em ambos os casos, situando-se em torno de 12 km no caso (c) e de 13 km no caso (d).

4.2.1 – Influência de soleiras na propagação da cunha salina

Na figura 13, onde se analisou o posicionamento das isolinhas de salinidade de 2 para as marés de sizígia e quadratura, observa-se que para vazões de aproximadamente $150 \text{ m}^3/\text{s}$ os dados referentes a maré de quadratura posicionam-se em torno do quilômetro 26, enquanto que os dados obtidos em maré de sizígia localizam-se entre os quilômetros 20 e 21. Estas posições parecem representar posições preferenciais da frente salina em torno da vazão de $150 \text{ m}^3/\text{s}$, de acordo com a maré. Esse efeito de retardamento da intrusão salina pela soleira foi verificado com a realização de experimentos numéricos.

A presença de depressões ao longo do estuário do rio Itajaí-Açu, algumas vezes seguidas de regiões de baixios (soleiras), suscitaram a realização de experimentos com o objetivo de investigar sua influência sobre o deslocamento da cunha salina.

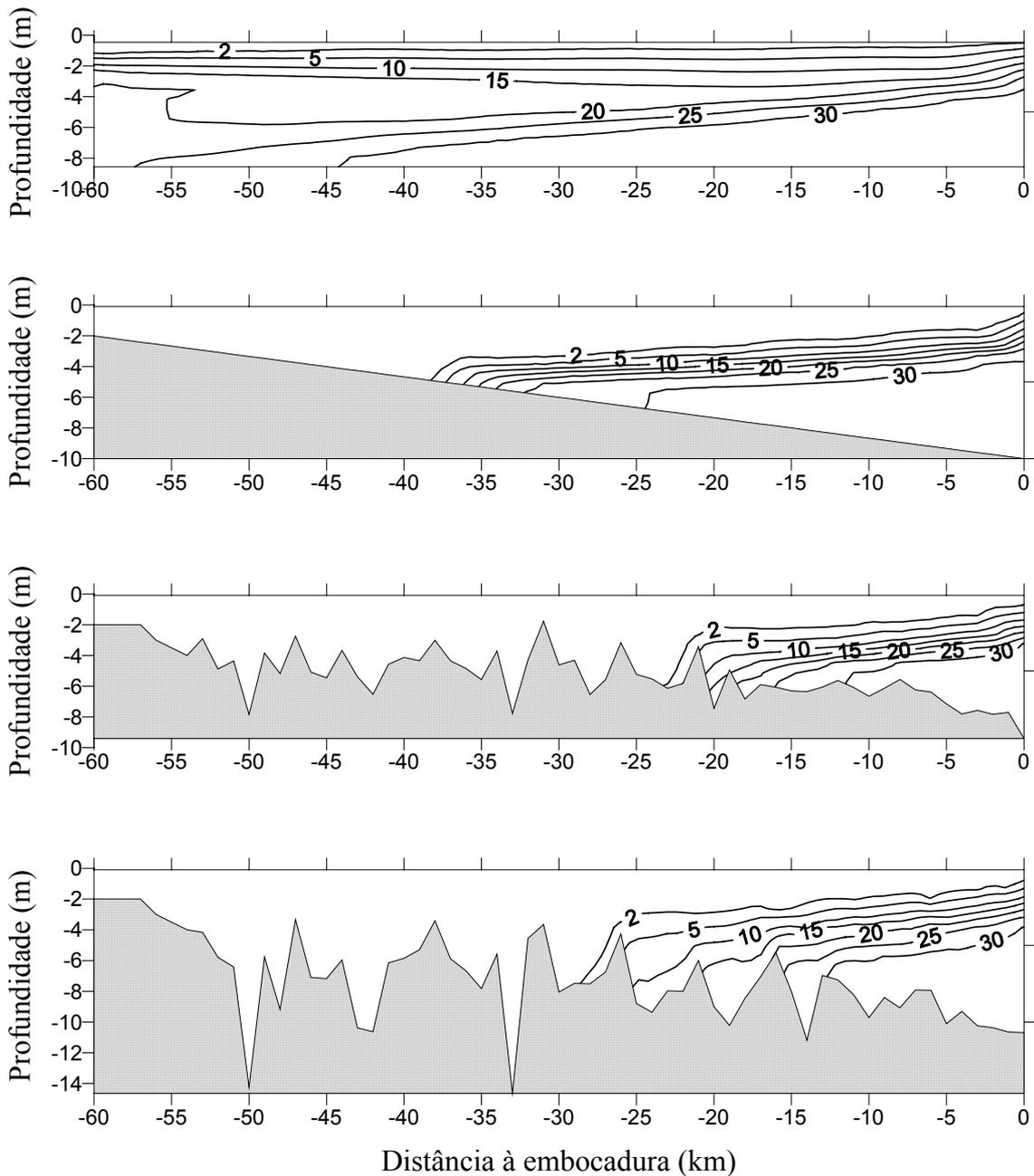


Figura 23 - Efeito da batimetria sobre a propagação e forma da cunha salina, considerando diferentes topografias de fundo. (a) fundo plano e horizontal; (b) fundo plano com declividade; (c) batimetria real com profundidades médias e (d) batimetria real com máximas profundidades.

No primeiro experimento, avaliou-se o comportamento da intrusão salina ao se deslocar sobre uma batimetria irregular, apresentando soleiras e depressões, considerando-se uma vazão constante de $140 \text{ m}^3/\text{s}$ e uma amplitude de maré de $0,1 \text{ m}$, correspondente às simulações anteriores. Foram realizados dois experimentos considerando a batimetria real, com as profundidades máximas, e a mesma batimetria

retirando-se uma das soleiras do fundo, no caso, aquela localizada no quilômetro 26, como mostrado na figura 24. Os resultados destes experimentos são também mostrados na figura 24 que apresenta as posições das isolinhas de salinidade 2 em função do tempo de simulação. O experimento A corresponde à batimetria real e o experimento B corresponde a batimetria real onde foi retirada a soleira considerando-se uma profundidade constante e igual a 8 m entre os quilômetros 26 e 30.

Pode-se acompanhar, na figura 24, a frente salina avançando no estuário em função do tempo de simulação, uma vez que no início da modelagem não havia sal dentro do estuário. Ambos os experimentos comportaram-se da mesma maneira até a hora 72 de simulação, quando a cunha alcançou o quilômetro 26. Até este instante observava-se, durante o primeiro ciclo de simulação, a cunha avançando de forma progressiva. No entanto, durante o segundo ciclo a cunha permanece no topo da soleira localizada a 16 km da embocadura por cerca de 4 horas até conseguir vencê-la e avançar. Este fato ainda é observado nos pontos situados a 21 e 24 km da embocadura, e se torna mais evidente na soleira situada a 26 km onde são necessários dois ciclos de maré para que a cunha consiga transpô-la (entre as horas 60 e 84). O modelo entra então em regime e a frente da cunha fica oscilando em torno desta soleira. No experimento B a frente da cunha desloca-se até a hora 70 de simulação de forma idêntica ao experimento A, mas não permanece durante o mesmo tempo nesta posição. Ela continua avançando por mais dois ciclos de maré até atingir o topo da soleira do quilômetro 31, de 3,7 m de profundidade, que provoca sua retenção até o final da simulação. Ou seja, para uma situação de vazão e amplitude de maré constantes, a presença de soleiras desempenha um importante papel sobre o avanço de uma cunha salina, retardando seu deslocamento para montante.

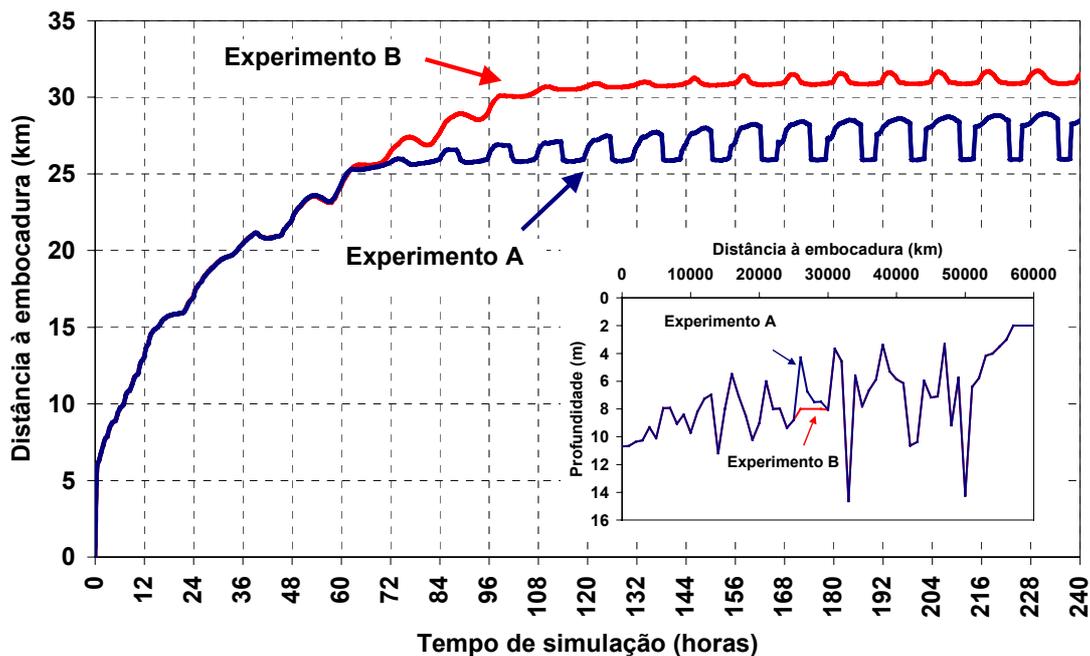


Figura 24 - Posicionamento da isolinha de salinidade 2 em função do tempo de simulação. Experimento A foi realizado com a batimetria real, e o experimento B apresenta a mesma batimetria, mas com profundidades constantes entre os quilômetros 26 e 30, apresentadas em detalhe no canto inferior da figura.

Considerando agora uma vazão variável no tempo, a fim de verificar o comportamento da intrusão salina em uma situação de decréscimo de vazões foi realizado um outro experimento. Os parâmetros de simulação foram os mesmos utilizados no anterior. A vazão fluvial foi prescrita constante de $300 \text{ m}^3/\text{s}$ até que o modelo estabilizasse, quando então, no 10º ciclo de simulação a vazão passou a decrescer linearmente até atingir o valor de $100 \text{ m}^3/\text{s}$, em um tempo total de 240 horas. Na figura 25 encontra-se representada a posição da isolinha de salinidade 2 em função do tempo de simulação, bem como as vazões simuladas. O efeito relatado por McANALLY e PRITCHARD (1997) de retenção da cunha em dada soleira para uma faixa de vazões é observado nesta figura entre as horas 192 e 264, quando a cunha permanece estacionária na soleira existente no quilômetro 21, com uma variação da vazão de 238 a $178 \text{ m}^3/\text{s}$, quando então a frente salina move-se para montante, e também entre as horas 290 e 360 quando a cunha permanece na soleira do quilômetro 26.

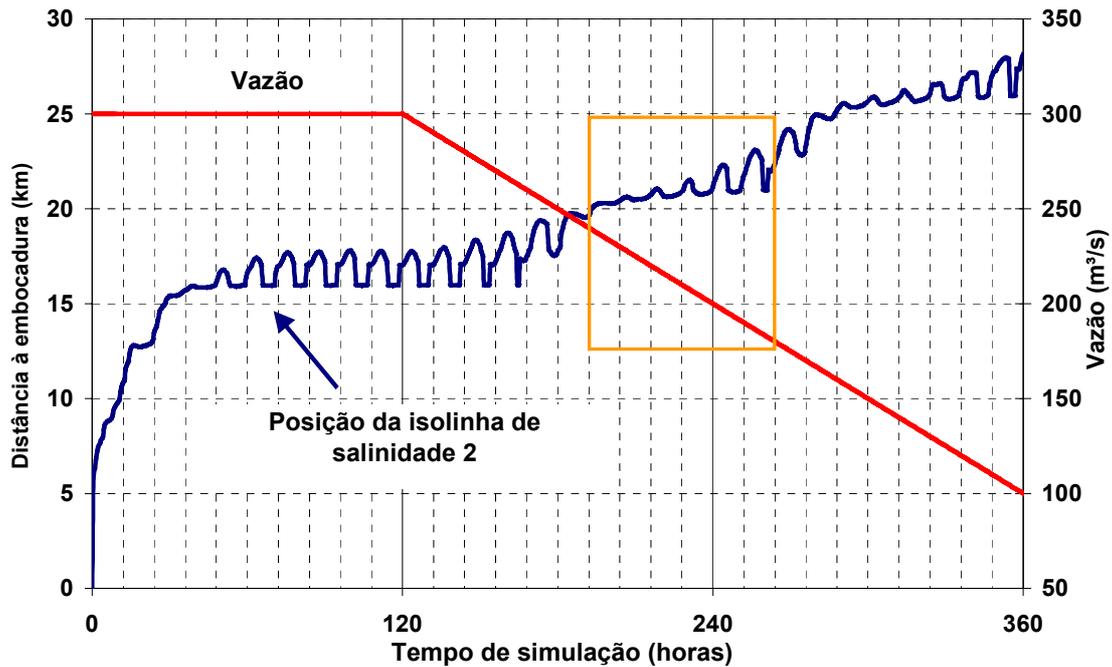


Figura 25 - Posicionamento da isolinha de salinidade 2 em função do tempo, para vazões variando de 300 a 100 m³/s durante a simulação. No retângulo em destaque percebe-se o aprisionamento provocado pela soleira situada no quilômetro 21 para determinada faixa de vazões.

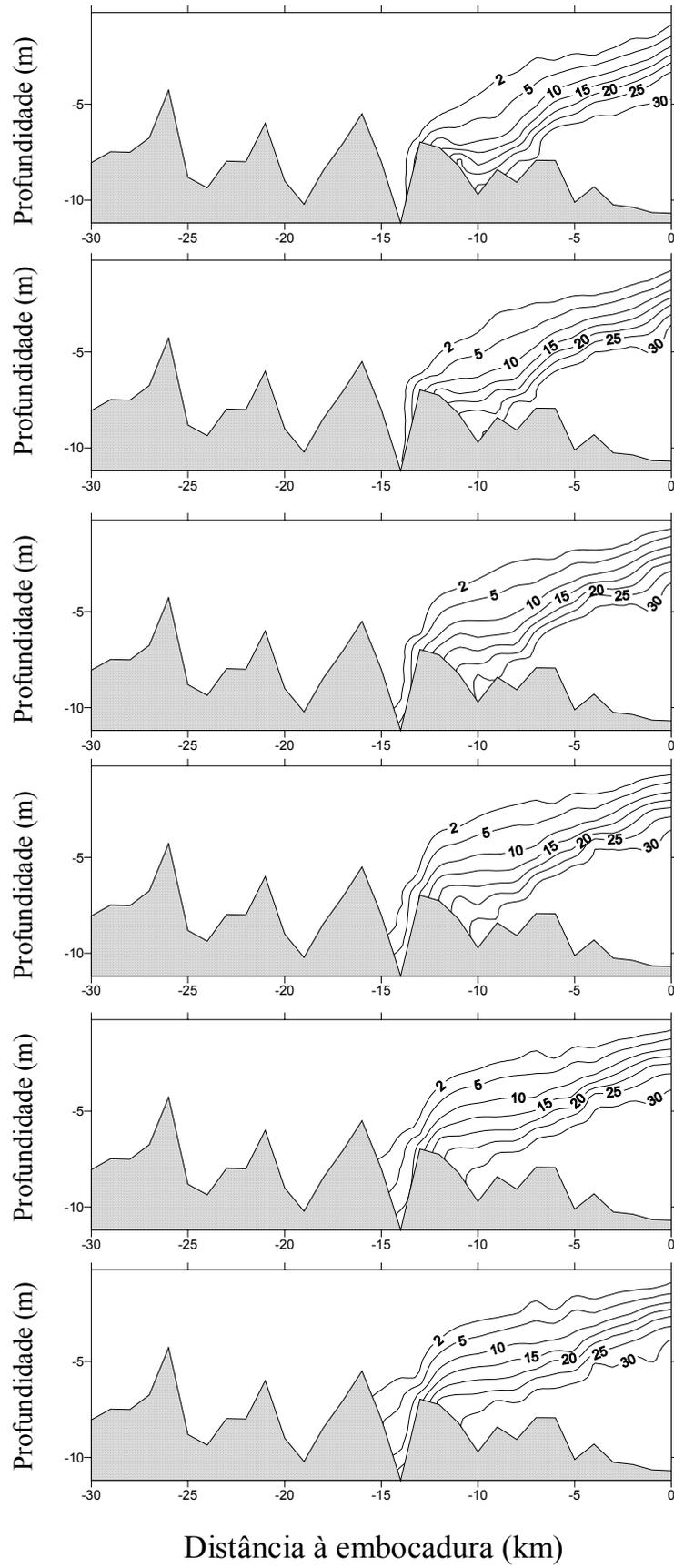
A presença de soleiras e depressões mostrou-se um importante fator no deslocamento da intrusão salina, seja retardando ou ainda aprisionando-a nestas feições. Os experimentos realizados neste trabalho foram baseados na batimetria levantada recentemente mas, vale ressaltar que a topografia de fundo do estuário sofre alterações ao longo do tempo, tanto em função dos pulsos de alta descarga a que o estuário do rio Itajaí-Açu está sujeito, como também, segundo Schettini (comunicação pessoal), pelas atividades de extração de areia existentes no trecho entre Blumenau e o quilômetro 15 a partir da embocadura.

Observações similares são encontradas na literatura. Por exemplo, VIERA e BORDALO (2000) realizaram um estudo no estuário do rio Douro com o objetivo de avaliar a propagação da onda de maré no estuário além de descrever sua estrutura salina para diferentes condições de vazão. Apesar do estuário ser do tipo mesomaré, a intrusão salina se mostrou influenciada pelo regime fluvial. Uma correlação polinomial entre o alcance da intrusão salina (considerada, naquele trabalho, como a posição alcançada pela isolinha de salinidade de 30) e a vazão fluvial foi ajustada. O baixo índice de

correlação obtido ($r^2 = 0,67$) é explicado pela topografia de fundo. Verificou-se que a cunha salina ocupa 3 posições preferenciais caracterizadas por depressões seguidas de soleiras para determinadas faixas de vazão. Este efeito foi observado também em um estudo de modelagem desenvolvido para o projeto de uma soleira temporária para limitação do avanço da intrusão salina no rio Mississippi descrito por McANALLY e PRITCHARD (1997). O estuário apresenta uma topografia de fundo com profundidades da ordem de 60 m intercaladas por soleiras naturais com cerca de 20 m de profundidade. Tal estudo teve como objetivo mitigar os efeitos de uma maior intrusão salina que ameaçou o abastecimento de água à cidade de New Orleans, em razão de um seca prolongada. Eles relatam que observações realizadas no campo e em estudos de modelagem mostram que durante o avanço da cunha salina para montante ocorre um atraso no seu deslocamento em determinadas soleiras. Verifica-se que a cunha ocupa uma mesma posição para uma determinada faixa de vazões no lugar de apresentar uma relação unívoca entre posição e vazão, que é o que se observa em estudos de modelagem numérica e hidráulica considerando profundidades constantes. Ressalta-se ainda que, em uma situação de declínio de vazões, a cunha mantém-se aprisionada em uma dada soleira para uma determinada faixa de vazões até que se atinja um limite crítico. Quando isso ocorre a cunha move-se rapidamente até encontrar uma outra soleira principal. As soleiras mais rasas são as mais eficientes no aprisionamento da cunha salina para faixas de vazão a medida em que há um declínio nas vazões.

O mecanismo de retardamento da intrusão salina por uma soleira pode ser visualizado acompanhando-se o avanço da frente salina na primeira simulação do item 4.2.1. A transposição da soleira pela cunha salina é mostrada para o caso da sobrelevação do quilômetro 16 na figura 26 (a) e (b). Esta soleira é precedida por uma forte depressão de aproximadamente 11 m de profundidade localizada no quilômetro 14. Em razão da pequena amplitude de maré de quadratura considerada na simulação, observa-se ao longo do ciclo pouca influência do instante da maré no padrão salino, assim como um avanço contínuo da frente. A transposição da soleira é realizada após o preenchimento da depressão do quilômetro 14 com água mais densa. Observa-se que a isolinha de 2 alcança o topo da soleira por volta da hora 8 de simulação mantendo-se praticamente estacionária até a hora 11, quando ocorre a transposição, demonstrando o efeito de aprisionamento ocasionado pela soleira.

(a)



(b)

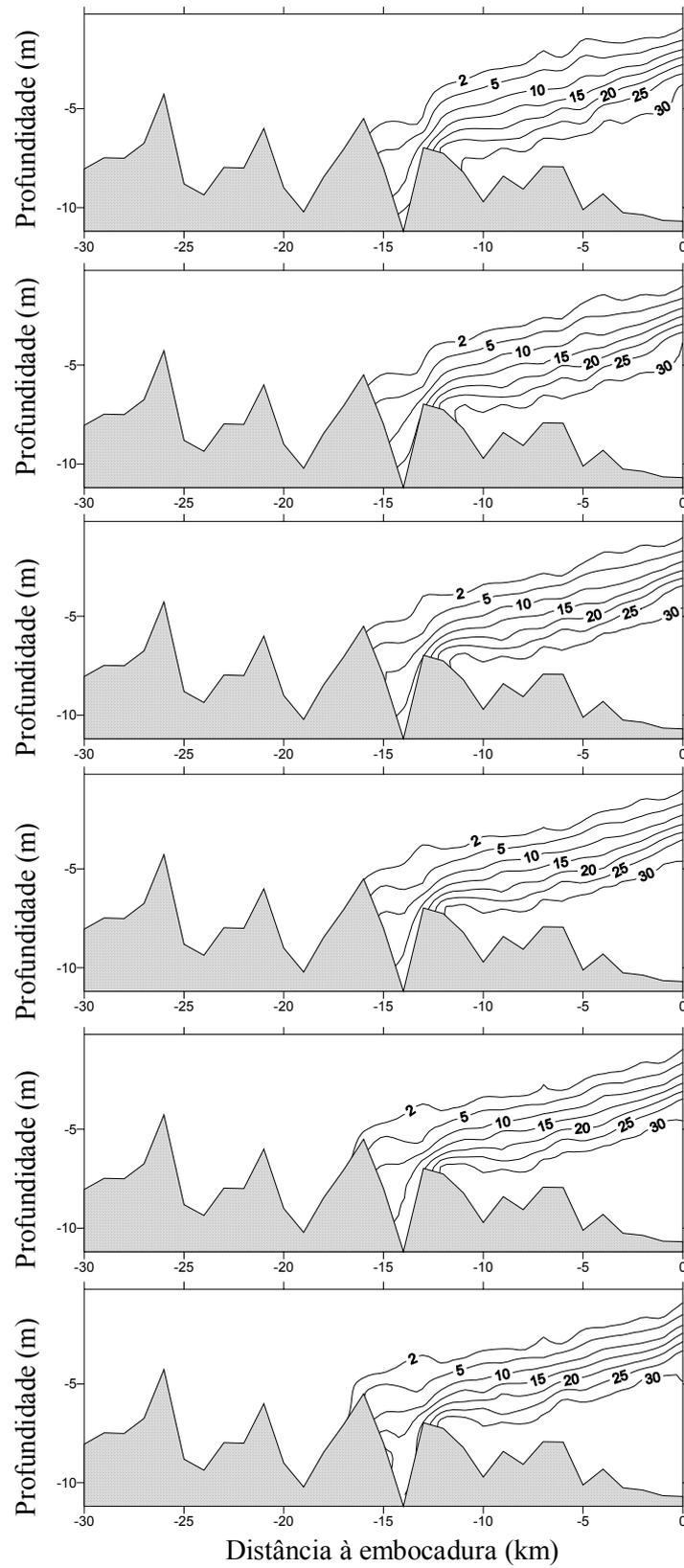


Figura 26 - Perfis longitudinais e verticais de salinidade obtidos pela modelagem numérica da (a) 1^a. a 6^a. e (b) da 7^a. a 12^a. hora do segundo ciclo de simulação.

5 – Conclusões e recomendações

O estuário do rio Itajaí-Açu é referenciado na literatura como um estuário estratificado (DOBEREINER, 1986) e recentemente classificado como de cunha salina por SCHETTINI (2001). Em outro estudo SCHETTINI e TRUCCOLO (1999a) verificaram a influência da vazão fluvial sobre a intrusão salina. No presente trabalho, através de análises qualitativas realizadas em um conjunto de dados de campo, foram observados padrões salinos diferenciados em função da maré.

Estudos realizados em outros estuários destacam a importância da batimetria no deslocamento da intrusão salina especialmente na presença de depressões e soleiras (VIEIRA e BORDALO, 2000, McANALLY e PRITCHARD, 1997). Nos dados mostrados por SCHETTINI e TRUCCOLO (1999b), onde se apresentam as posições alcançadas pelas isolinhas de salinidade de 2 e 30 ao longo de um ciclo de maré, este efeito de retenção da intrusão salina pode ser percebida para a isolinha de 2 na depressão localizada a 14 km da embocadura.

Com base nestas questões foi analisado um conjunto de 44 levantamentos de salinidade ao longo do estuário do rio Itajaí-Açu e foi empregada modelagem numérica de forma complementar para responder algumas das questões que os dados não permitiram abordar.

O modelo numérico empregado foi capaz de reproduzir as principais características dos padrões salinos observadas nos dados do estuário do rio Itajaí-Açu em função da maré, tais como, a diferença de padrões salinos e as variações observadas no alcance da intrusão salina de acordo com a maré.

Em relação ao efeito da maré sobre o grau de estratificação do estuário verificou-se, a partir de uma análise dos gradientes máximos de salinidade vertical ao longo do estuário para as marés de sizígia e quadratura, que esta tem importante papel. Observam-se comportamentos diferenciados entre os dois casos, com os valores apresentados para a maré de quadratura superiores aos obtidos em sizígia, demonstrando assim condições mais estratificadas durante a quadratura e de maior mistura durante a sizígia. A vazão fluvial, por outro lado, desempenha uma maior influência sobre o

alcance da intrusão salina, enquanto que não se percebe sua influência sobre o grau de estratificação.

Uma análise do alcance da intrusão salina no estuário permitiu verificar uma forte variação no posicionamento da isolinha de salinidade de 30 para os perfis obtidos durante a maré de sizígia de acordo com o instante de maré, após baixamar e após preamar. Apesar da maior parte dos dados obtidos durante a maré de sizígia apresentarem características de maior mistura, os perfis que mostraram um maior avanço da isolinha de 30 foram justamente os obtidos após a preamar com características de um padrão mais estratificado. Este fato pode estar associado à variação do grau de estratificação dentro de um ciclo de maré em função dos diferentes mecanismos que ocorrem nas marés enchente e vazante. Diversos autores têm verificado este efeito (DYER, 1997, NEPF E GEYER, 1996, VIEIRA e BORDALO, 2000, JAY e SMITH, 1990) e a realização de uma campanha com medições de velocidade e salinidade ao longo de um ciclo de maré, em maré de sizígia, permitiriam avaliar a ocorrência de diferentes graus de estratificação dentro de um ciclo de maré no estuário do rio Itajaí-Açu.

Este comportamento dos perfis de sizígia obtidos após a preamar também foi percebido avaliando-se a salinidade média presente no estuário, que se mostrou bastante variável de acordo com o instante de maré. Verificou-se, porém, pouca diferença na salinidade média, em função do instante da maré, para os perfis de quadratura, observando-se também valores decrescentes de acordo com o aumento de vazão. A modelagem numérica foi utilizada para investigar as oscilações da salinidade média em função da amplitude de maré e de duas situações de vazão fluvial (150 e 300 m³/s). Os resultados obtidos com a modelagem concordaram com os valores apresentados pelos dados. Para as situações modeladas durante a maré de quadratura observa-se uma salinidade média superior às verificadas na maré de sizígia. Enquanto que na maré de quadratura a salinidade média no estuário sofre poucas variações dentro de um ciclo de maré, grandes variações são observadas para a maré de sizígia. Outro fato interessante observado é que a vazão fluvial produz um maior efeito de redução da quantidade média de sal no estuário durante a maré de quadratura do que de sizígia, verificando-se ainda que esta redução da salinidade média no estuário em maré de quadratura em função da

duplicação da vazão fluvial é da ordem da amplitude da curva de variação da salinidade média em maré de sizígia.

A influência da batimetria no deslocamento da intrusão salina foi verificada através da modelagem numérica. A utilização de diferentes topografias de fundo permitiu observar que a batimetria possui importante papel na extensão alcançada pela intrusão salina, seja pela presença da declividade do fundo ou pela ocorrência de profundidades maiores, sobre a forma da cunha e sobre o posicionamento das isolinhas de salinidade devido às irregularidades do fundo do estuário.

O efeito de retardamento da frente de intrusão salina na presença de depressões seguidas por soleiras na topografia de fundo do estuário do Itajaí-Açu foi também investigada numericamente. Para amplitude de maré e vazão fluvial constantes, as soleiras existentes no estuário influenciaram o avanço da intrusão salina atrasando seu deslocamento para montante. Para vazões diminuindo ao longo do tempo, verificou-se que a cunha move-se para montante no estuário, mantendo-se aprisionada nas principais soleiras durante faixas discretas de vazões.

A influência da maré se mostrou importante na caracterização dos padrões salinos existentes no estuário do rio Itajaí-Açu e na salinidade média do estuário, assim como a presença de soleiras e depressões na topografia de fundo afetam o deslocamento da intrusão salina. No entanto, a calibração do modelo e a verificação da influência da maré ao longo de um ciclo requereriam medições simultâneas de salinidade, nível d'água e velocidade da corrente, em seções pontuais ou em perfis longitudinais, ao longo do ciclo da maré, para situações de maré de sizígia e quadratura e para diferentes vazões (p. ex. 150, 300 e 600 m³/s). Uma análise da dinâmica da onda de maré no estuário se faz importante a fim de que o padrão de circulação hidrodinâmico do estuário seja determinado.

6 – Referências Bibliográficas

- ABBOT , M. B., BASCO, D. R., 1989, *Computational Fluid Dynamics – An introduction for Engineers*, New York, Longman Scientific & Technical.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. Hidroweb, Sistema de Informações Hidrológicas. [on line] Disponível na Internet via WWW.
URL: <http://hidroweb.aneel.gov.br/HidroWeb.asp>. 2002
- ASSELIN, R., 1972, “Frequency filter for time integration”, *Mon. Weather Rev.*, n. 100, pp. 487-490.
- BECKMANN, A., HAIDVOGEL D. B., 1993, “Numerical Simulation of Flow around a Tall Isolated Seamount. Part I: Problem Formulation and Model Accuracy”, *Journal of Physical Oceanography*, v. 23, pp. 1736-1753.
- BLUMBERG, A. F., 1975, *A Numerical investigation into the dynamics of estuarine circulation*. Chesapeake Bay Institute, Technical Report 91, The Johns Hopkins University, 110 p.
- BLUMBERG, A. F., MELLOR, G. L., 1987, *A Description of a Three-Dimensional Coastal Ocean Circulation Model*. In N. S. Heaps (editor), *Three-Dimensional Coastal Ocean Circulation Models*. Coastal and Estuarine Sciences, vol. 4, AGU, Washington, DC.
- DHN, Diretoria de Hidrografia e Navegação, *Tábuas das Marés*, Rio de Janeiro, 1997 e 1998.
- DOBEREINER, C. E., 1986, “Sedimentação no Estuário do Rio Itajaí-Açu”, In: *Anais do 12º Congresso Latino Americano de Hidráulica*, v. 3, pp. 68-79, São Paulo.
- DYER, K. R., 1997, *Estuaries: A Physical Introduction*, 2^a ed., England, John Wiley & Sons Ltd.

- FORD, M., WANG, J., CHENG, R. T., 1990, "Predicting the Vertical Structure of Tidal Current and Salinity in San Francisco Bay, California", *Water Resources Research*, v. 26, n. 5, pp. 1027-1045.
- GEYER, W. R., FARMER, D. M., 1989, "Tide-Induced Variation of the Dynamics of a Salt Wedge Estuary", *Journal of Physical Oceanography*, v. 19, pp. 1060-1072.
- HANEY, R. L., 1991, "On the Pressure Gradient Force over Steep Topography in Sigma Coordinate Ocean Models", *Journal of Physical Oceanography*, v. 21, pp. 610-619.
- HANSEN, D. V., RATTRAY JR., M., 1966, "New dimensions on estuarine classification", *Limnology and Oceanography*, v. 11, pp 319-326.
- HARLEMAN, D. R. F., THATCHER, M. L., 1974, "Longitudinal dispersion and unsteady salinity intrusion in estuaries", *La Houille Blanche*, n. 1/2, pp. 25-33.
- JAY, D. A., SMITH, J. D., 1990, "Residual Circulation in Shallow Estuaries – 1. Highly Stratified, Narrow Estuaries", *Journal of Geophysical Research*, v. 95, n.C1, pp. 711-731.
- KLIEM, N., PIETRZAK, J. D., 1999, "On the pressure gradient error in sigma coordinate ocean models: A comparison with a laboratory experiment", *Journal of Geophysical Research*, v. 104, n. C12, pp. 29.781-29.799.
- KURUP, G. R., HAMILTON, D. P., PATTERSON, J. C., 1998, "Modelling the Effect of Seasonal Flow Variations on the Position of Salt Wedge in a Microtidal Estuary", *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 47, pp. 191-208.
- MARTINS, R. P., 1999, *Desenvolvimento de um modelo numérico de circulação tridimensional para corpos d'água naturais com densidade variável*. Tese de D. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

- McANALLY, W. H., PRITCHARD, D. W., 1997, “Salinity Control in Mississippi River Under Drought Flows”, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, v. 123, n. 1, pp. 34-40.
- MEDEIROS, A. D., VINZON, S. B., 2000, “Dinâmica da intrusão salina no Canal de São Francisco, RJ”, In: *1º. Congresso sobre Aproveitamentos e Gestão de Recursos Hídricos em Países de Idioma Português*, I-019, Rio de Janeiro, 17-20 Abril 2000.
- McCALPIN, J. D., 1994, “A Comparison of Second-Order and Fourth-Order Pressure Gradient Algorithms in a σ -Co-ordinate Ocean Model”. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, v. 18, pp. 361-383.
- NEPF, H. M., GEYER, W. R., 1996, “Intratidal variations in stratification and mixing in the Hudson estuary”, *Journal of Geophysical Research*, v. 101, n. C5, pp. 12.079-12.086.
- OTTONI, A. B., 1986, *A Implantação de Sistemas de Navegação em Regiões Estuarinas*. Tese de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- PAIVA, A. M., 1992, *Desenvolvimento de um Modelo Numérico de Circulação para Estuários Estratificados*. Tese de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- PAIVA, A. M., ROSMANN, P. C. C., 1993, “Modelagem numérica de circulação em estuários estratificados”. In: *Anais do X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos – ABRH*, v. 5, p. 488-494, Gramado – RS, Novembro.
- PHILIPS, N. A., 1957, “A co-ordinate system having some special advantages for numerical forecasting”, *Journal of Meteorology*, v. 14, pp. 184-185.
- SCHETTINI, C. A. F., 2001, *Dinâmica de sedimentos finos no estuário do Rio Itajaí-Açu, SC*. Tese de D. Sc., UFRGS – Programa de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre, RS, Brasil.

- SCHETTINI, C. A., TRUCCOLO, E. C., 1999a, “Dinâmica da intrusão salina no estuário do rio Itajaí-Açu”, In: *Congresso Latino Americano de Ciências do Mar*, 8, Trujillo, Peru, *Resúmenes ampliados* . Tomo II, UNT/ALICMAR, pp. 639-640
- SCHETTINI, C. A., TRUCCOLO, E. C., 1999b, “Tidal-driven influences on the shape of an estuarine salt wedge: Itajaí-Açu river, South Brazil”, In: *Symposium on Tidal Action, Tidal Processes and Tidal Effects on Coastal Evolution*, VII Brazilian Association for Quaternary Studies (ABEQUA), Porto Seguro, Brazil, 03-09 Outubro
- SLORDAL, L. H., 1997, “The Pressure Gradient Force in Sigma-Co-ordinate Ocean Models”, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, v. 24, pp. 987-1017.
- STELLING, G. S., VAN KESTER, J. A. TH. M., 1994, “On the Aproximation of Horizontal Gradients in Sigma Co-ordinates for Bathymetry with Steep Bottom Slopes”, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, v. 18, pp. 915-935.
- UNCLES, R. J., STEPHENS, J. A., 1996, “Salt Intrusion in the Tweed Estuary”, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 43, pp. 271-293.
- VIEIRA, M. E. C., BORDALO, A. A., 2000, “The Douro estuary (Portugal): a mesotidal salt wedge”, *Oceanologica Acta*, v. 23, n. 5, pp. 585-594.
- WANG, D. P., KRAVITZ, D. W., 1980, “A Semi-Implicit Two-Dimensional Model of Estuarine Circulation”, *Journal of Physical Oceanography*, v. 10, pp. 441-451.
- WANG, J., 1998, “A two-channel laterally averaged estuarine circulation model (LAECIM)”, *Journal of Geophysical Research*, v. 103, n. C9, pp. 18.381-18.391.