

## Caracterização Física do Estuário do Rio Itajaí-açu, SC

Carlos A. F. Schettini

Centro de Ciências Tecnológicas da Terra e do Mar – CTTMar/Universidade do Vale do Itajaí – UNIVALI  
Caixa Postal 360 - CEP 88302-202 Itajaí, SC - [guto@cttmar.univali.br](mailto:guto@cttmar.univali.br)

Recebido: 10/05/01 - revisão: 15/08/01 - aceito: 14/12/01

### RESUMO

*Este artigo apresenta uma descrição física do estuário do rio Itajaí-açu em relação aos aspectos hidrodinâmicos, hidrológicos e sedimentológicos. Apresenta-se sucintamente resultados de estudos já realizados na região, tanto em termos de agentes determinantes externos (fluvial, marinho e atmosférico), quanto de processos internos do corpo estuarino. Em termos gerais, o estuário apresenta circulação do tipo cunha salina, sendo controlado primeiramente pela descarga fluvial e, em menor grau, pelas oscilações do nível do mar, tanto astronômicas quanto meteorológicas. Ondas e ventos aparentemente não desempenham papel direto como determinantes dos processos hidrodinâmicos e sedimentológicos no estuário. O estuário exporta a maior parte dos sedimentos em suspensão trazidos pelo rio, embora também haja importação de sedimentos da plataforma continental através das correntes de fundo. A atividade antrópica associada com a dragagem vêm alterando sistematicamente a partir dos anos 50 o comportamento hidráulico-sedimentológico do baixo estuário.*

**Palavras-chave:** estuário; hidrodinâmica; hidrologia; sedimentologia; rio Itajaí-açu.

### INTRODUÇÃO

Estuários são corpos de águas restritos onde ocorre a diluição mensurável da água marinha pela água doce proveniente da drenagem continental, tendo uma livre conexão com o mar aberto (Cameron & Pritchard, 1963), e com seu limite continental definido como o limite dos efeitos da maré (Fairbridge, 1980). Ao longo dos estuários podem ser observadas significativas variações dos principais processos oceanográficos atuantes e, em muitos casos, é possível identificar três regiões distintas: 1) alto estuário, onde não há presença de água marinha, observando-se apenas os efeitos das marés; 2) médio estuário, onde ocorre a interação de águas continentais e oceânicas; e 3) baixo estuário, com predominância de processos oceânicos (Dionne, 1963), podendo cada região apresentar características sedimentológicas e geomorfológicas distintas (Dalrymple et al., 1992). Os estuários apresentam uma grande diversidade fisiográfica (Fairbridge, 1980), sendo que denominações geográficas como baías, lagoas costeiras e rios em seus trechos terminais também caracterizam ambientes estuarinos (Kjerfve, 1989).

Grande parte da ocupação e desenvolvimento humano se deu a partir das margens de estuários, devido às condições geográficas favoráveis oferecendo águas abrigadas margeadas por extensas planícies costeiras, por exemplo, Rio de Janeiro,

Santos, Belém, etc. Contudo, devido ao contínuo e desordenado crescimento da população humana ao seu redor, cada vez mais estes ambientes vêm sofrendo impactos advindos de diferentes tipos de atividades, tais como aterros hidráulicos, despejo de efluentes domésticos e industriais, retificação de canais com dragagens para implementação de atividades portuárias, entre outros.

Os estuários constituem um importante elo na ecologia global, uma vez que é através destes ambientes que passa a maior parte da matéria originada da decomposição intempérica dos continentes em direção aos oceanos. Contudo, a despeito de sua importância, relativamente poucos estuários ao redor do mundo são efetivamente conhecidos ao ponto de que este conhecimento forneça bases para tomadas de decisão para o desenvolvimento sustentável. O conhecimento sobre ambientes estuarinos ao longo do litoral brasileiro ainda é insignificante, e o objetivo deste trabalho é fornecer uma descrição sucinta sobre as características físicas do estuário do rio Itajaí-açu através da revisão de estudos realizados neste ambiente pelo Instituto Brasileiro de Pesquisas Hidroviárias (INPH) e Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT) nas décadas de 70 e 80 do século passado, e mais

recentemente pelo Centro de Ciências Tecnológicas da Terra e do Mar (CTTMar) da Universidade do Vale do Itajaí (UNIVALI).

Os primeiros levantamentos de dados e estudos no estuário do rio Itajaí-açu, similar ao que se observa para muitos outros sistemas estuarinos, foram desenvolvidos para subsidiar a implementação de obras de engenharia, no caso, a instalação do porto de Itajaí e a construção dos molhes, por exemplo, Fleming (1935). Estes estudos iniciais foram, em sua maioria, realizados pelo INPH, por exemplo Vargas (1983), Döbereiner (1985 e 1986), Homsí e Novaes (1987), e pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT), por exemplo, Ponçano (1982 e 1987), focando principalmente aspectos do baixo estuário. A partir da criação do curso de graduação em oceanografia na UNIVALI em 1994, acompanhado de um grupo de pesquisa em ciências do mar, houve um impulso de novos estudos no estuário e em sua região de influência na zona costeira, por exemplo, Schettini et al. (1995, 1996, 1997 e 1998), Bellotto et al. (1996), Kuroshima & Bellotto (1997), Schettini & Carvalho (1998a), Schettini & Truccolo (1999a e b), Schettini (2000a e b) entre outros.

## LOCALIZAÇÃO E CONTEXTO

O estuário do rio Itajaí-açu está localizado no litoral centro norte de Santa Catarina, aproximadamente 80 km ao norte de Florianópolis, desaguardo no oceano Atlântico em 26° 54,7' S e 048° 38,1' O (Figura 1). Este sistema apresenta grande importância econômica regional, pois nele está localizado o porto de Itajaí, sendo este a principal via de comércio marítimo do Estado, além de diversos terminais portuários menores. Um grande número de indústrias pesqueiras estão instaladas ao longo de ambas as margens, sendo a região de maior desembarque pesqueiro do Brasil.

Além de sua importância econômica, este sistema apresenta também grande importância ecológica para a zona costeira regional pois é o maior sistema fluvial entre o sistema lagunar Patos-Mirim no Rio Grande do Sul, 700 km ao sul, e o rio Ribeira do Iguape em São Paulo, 300 km ao norte. O estuário recebe o aporte de uma bacia de drenagem de 15.500 km<sup>2</sup> (Figura 1), sendo a maior bacia da Vertente Atlântica (VA) catarinense. A bacia do rio Itajaí esta entre as outras duas maiores bacias da VA: a bacia do rio Itapocu ao norte, com 2.930 km<sup>2</sup>, e a bacia do rio Tijucas ao sul, com 2.420 km<sup>2</sup>. Os três sistemas fluviais juntos perfazem 60% da área da VA, estando estas bacias limitadas ao norte pela Serra do Mar, e à oeste e sul pela Serra Geral, estando separadas entre si por formações rochosas menores.

O rio Itajaí-açu é o responsável pela maior parte do aporte fluvial para o estuário, atribuindo-se a ele aproximadamente 90% do total. Os 10% restantes são atribuídos ao rio Itajaí-mirim, que aporta na bacia estuarina a 9 km da barra e a outros tributários menores como o rio Luis Alves. O rio Itajaí-açu é formado pela confluência dos rios Itajaí do Sul com o Itajaí do Oeste, onde está localizada a cidade de Rio do Sul, recebendo o aporte do Itajaí do Norte ou Hercílio um pouco a justante (Figura 1). Estes três tributários apresentam mais ou menos as mesmas dimensões. Quando o rio Itajaí-açu recebe o aporte do Itajaí-mirim, já no estuário, ele passa a ser denominado rio Itajaí. No Vale do Itajaí estão localizadas as cidades de Itajaí, Blumenau, Rio do Sul, sendo que no Médio e Baixo Vale predominam atividades industriais, enquanto que no Alto Vale predominam atividades agropecuárias.

## FISIOGRAFIA

O estuário do rio Itajaí-açu pode ser classificado como sendo de planície costeira segundo os tipos geomorfológicos de estuários sugeridos por Pritchard (1967), e como estuário de frente deltaica segundo a classificação fisiográfica proposta por Fairbridge (1980). Sua morfologia atual sugere que o sistema encontra-se num estado próximo ao de equilíbrio hidráulico, por exemplo, Friedrichs (1995), com o raio hidráulico oscilando em torno de um valor médio como resposta às variações lunares da maré e eventos hidrológicos críticos.

O estuário percorre uma planície costeira com formato afunilado, iniciando na altura de Blumenau e abrindo para o oceano. Este trecho é bastante plano, apresentando declividade de 0,03%; para montante de Blumenau a declividade aumenta para 0,40% (Figura 2; GAPLAN, 1986), já havendo a presença de corredeiras e pequenas quedas de água, caracterizando o limite superior do estuário.

O estuário apresenta uma extensão aproximada de 70 km, com área de espelho de água estimada em 14 km<sup>2</sup> (Figura 3). Até 20 km a montante da desembocadura o estuário apresenta seis meandros bem definidos, com uma orientação geral de noroeste-sudoeste. A partir de 20 km para montante ainda ocorrem meandros, porém não tão simétricos quanto os observados próximos à desembocadura, com orientação geral de nordeste-sudoeste até a altura de Gaspar. Deste ponto até Blumenau a orientação geral passa para leste-oeste. No trecho entre as cidades de Ilhota e Gaspar a fisiografia do estuário é bastante retilínea, mantendo este padrão até as proximidades de Blumenau, onde volta a ocorrer meandros, bem como as primeiras ilhas fluviais.

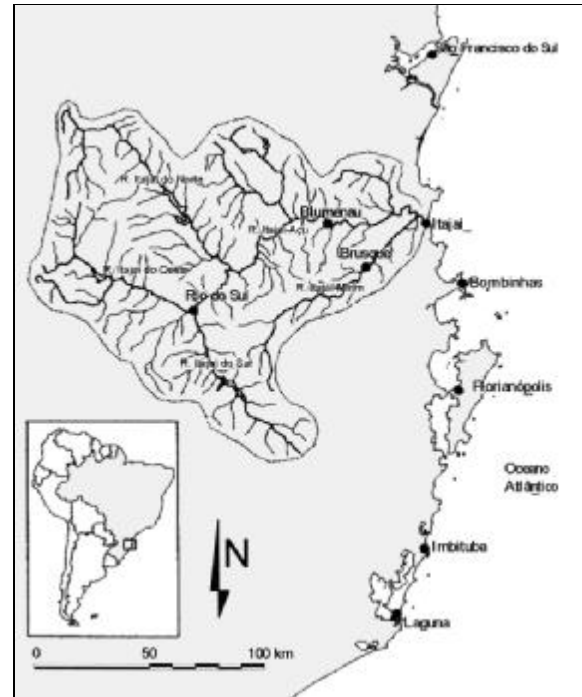
A largura do canal é relativamente uniforme ao longo de todo o estuário, com um pequeno e

gradual aumento em direção à desembocadura. No trecho entre Blumenau e Ilhota a largura média varia entre 100 e 150 metros, e nos 20 km próximos à desembocadura a largura varia entre 150 e 300 metros. Somente em alguns pontos localizados ocorre o estreitamento acentuado devido à presença de afloramentos rochosos. Não existe um detalhamento da batimetria, porém todo o estuário é navegável, sendo que inclusive o transporte por barcos foi bastante utilizado no início do Século XX. A partir de observações não metódicas, por exemplo, profundímetro de embarcação esportiva, acredita-se que na maior parte do estuário a profundidade esteja entre 5 e 8 metros, havendo pontos localizados com profundidade superior à 10 metros. Atualmente observa-se intensa atividade de extração de areia a partir de 15 km a montante da desembocadura até Blumenau, contudo a influência desta atividade sobre a profundidade do canal e na dinâmica costeira não foi avaliada até o momento.

Próximo à desembocadura existem levantamentos batimétricos detalhados desde o início do Século XX, dada a presença de atividade mercante em Itajaí. Uma carta batimétrica datada de 1926 indica que o canal na região próximo à desembocadura apresentava profundidade superior a 7 metros, com máxima nos extremos dos meandros superior a 11 metros. A região mais rasa encontrava-se na barra, com profundidade inferior a 5 metros.

Antes das obras de retificação da Barra do Itajaí-açu, esta era formada por um pontal arenoso que se estendia a partir da praia de Navegantes para o sul, com o canal da barra formando mais um meandro contornando o morro do Atalaia (Figura 4). Atualmente a barra está totalmente retificada por diversos enrocamentos formando espigões e molhes. As obras de retificação iniciam a aproximadamente 2,5 km a montante da linha de praia de Navegantes, com molhes assimétricos, com o molhe sul adentrando aproximadamente 800 metros na plataforma.

As obras de retificação tornaram o canal de acesso ao porto de Itajaí mais retilíneo e seguro



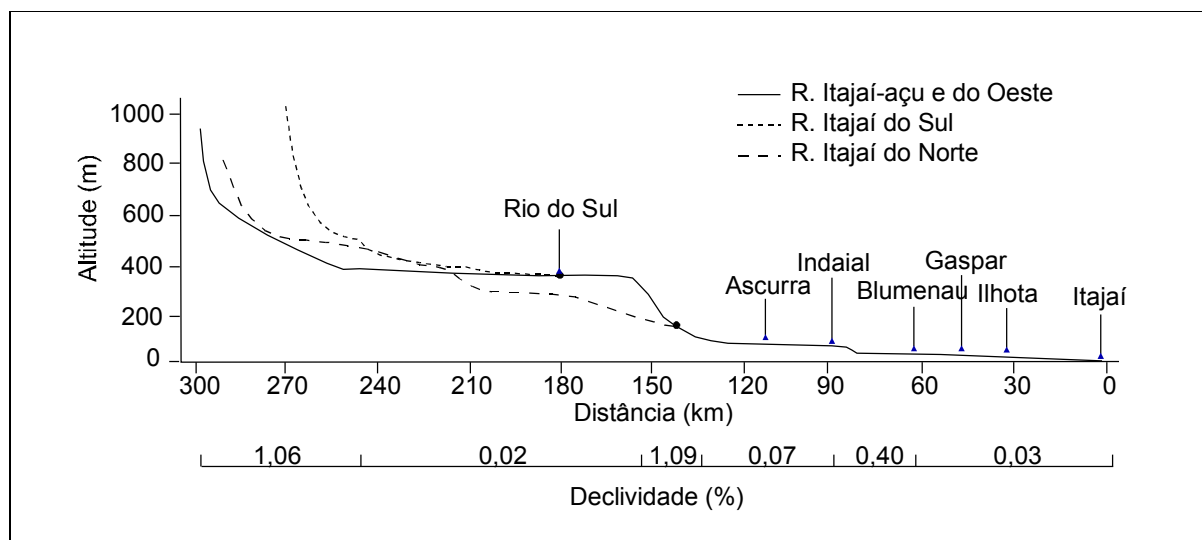
**Figura 1. A bacia hidrográfica do rio Itajaí-açu no contexto da linha de costa de Santa Catarina, com indicação das principais cidades costeiras e do Vale do Itajaí, e localização na América Latina no detalhe.**

para navegação, contudo o meandro isolado pelos enrocamentos na margem de Itajaí forma hoje o Saco da Fazenda. Devido à circulação de água restrita a uma única abertura com o canal do estuário, o saco constitui atualmente uma bacia de deposição de sedimentos trazidos pelo rio Itajaí-açu, e a pouca circulação traz também sérios problemas ambientais.

## COMPONENTE FLUVIAL

O monitoramento diário da descarga líquida é realizado no rio Itajaí-açu desde 1934 em algumas estação fluviométricas mantidas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, antigo Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica, DNAEE). A estação fluviométrica de Indaial é a mais próxima da desembocadura sem sofrer influência da maré. Esta estação está a 90 km da desembocadura, representando uma área de captação de 11.110 km<sup>2</sup>, ou aproximadamente 70% de toda a bacia de drenagem.

A análise dos dados de descarga diária de 1934 até 1998 fornecem uma descarga média de  $228 \pm 282 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ , com mínima de 17 e máxima de



**Figura 2. Perfil de declividade dos principais rios do Vale do Itajaí. Os valores de declividade são para o rio Itajaí-açu e do Oeste (modificado de GAPLAN, 1986).**

$5.390 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ , sendo que a máxima ocorreu em 1984 durante um evento de El Niño, um dos mais intensos já observado na região. A descarga média mensal apresenta dois picos de máxima descarga ao longo do ano, em fevereiro,  $285 \pm 185 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ , e em outubro,  $309 \pm 192 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ , e dois picos de mínima, em abril,  $164 \pm 110 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ , e dezembro,  $185 \pm 124 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  (Figura 5; Tabela 1). Porém, é notável a alta variabilidade destes dados médios mensais através do coeficiente de variação. A variabilidade é bastante grande durante todo o ano, sendo máxima nos meses de julho e agosto, e mínima nos meses de março e outubro.

Não obstante, a variação da descarga média mensal como mostrada na Figura 5 é demasiadamente sintética, dado que o regime hidrológico do rio Itajaí-açu é consideravelmente variável ao longo do tempo, tanto em termos sazonais quanto em termos inter-anuais ou até mesmo decadais. A Figura 6 apresenta a evolução temporal da descarga em termos de médias mensais e anuais, com seus respectivos histogramas de frequência. As médias anuais apresentam uma distribuição bimodal, sendo que a interface entre as modas se dá aproximadamente próximo da descarga média geral ( $\approx 230 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ). Esta distinção de modas está possivelmente associada com a instabilidade climática que se observa em Santa Catarina decorrente de fenômenos de escala global como a Oscilação Sul – El Niño.

Durante os anos de ocorrência do El Niño observa-se o aumento da pluviosidade nos Estados do sul e sudeste do Brasil, acompanhado de secas no nordeste. Durante os anos ditos normais, sem influência do El Niño, a pluviosidade no sul é comparativamente menor, e maior no nordeste do país

(Gan, 1992). Tal variabilidade climática como regulador do regime hidrológico obviamente influencia o regime de descarga fluvial, acarretando na variabilidade inter-anual observada. Adicionalmente, a intensidade do fenômeno El Niño varia a cada ocorrência, e a concentração de precipitação atmosférica não ocorre necessariamente sempre sobre as mesmas regiões, como apontado por Martin et al. (1992).

A distribuição de frequência das médias mensais (Figura 6) apresenta uma distribuição unimodal, com forte assimetria negativa. Isto reflete a descarga do rio: relativamente baixa durante a maior parte do tempo, inferior ao valor médio, com ocorrência de pulsos esporádicos em função da precipitação na bacia hidrográfica. Os períodos de baixa descarga entre pulsos de alta descarga duram em média 11 dias, porém podem ocorrer períodos de baixa descarga com mais de 120 dias de duração (Schettini & Carvalho, 1998a).

## INTERAÇÃO ESTUÁRIO-OCEANO

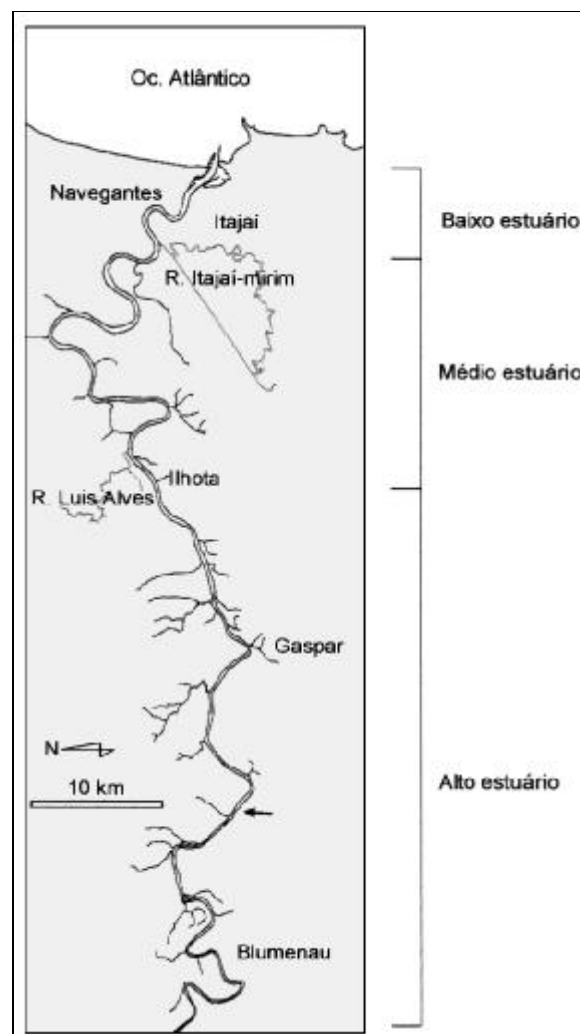
A influência marinha sobre o estuário do rio Itajaí-açu se dá basicamente em função das características das massas de água que ocorrem no litoral centro norte de Santa Catarina, e pelas osci-

lações do nível do mar causadas por efeitos astronômicos e meteorológicos. A ação direta de ondas de gravidade não desempenha um papel importante atualmente, visto que a barra do estuário encontra-se totalmente retificada, e o corpo estuarino apresenta-se demasiadamente sinuoso, não havendo pista para formação de ondas de altura suficiente para desempenhar um papel importante na dinâmica sedimentar da bacia estuarina. Os processos que ocorrem no estuário e na bacia de drenagem, por sua vez, influenciam a circulação costeira sobre a plataforma continental adjacente através da dispersão da pluma fluvial.

## Massas de água

O tipo de água na plataforma interna adjacente a foz pode variar em resposta a forçantes oceanográficas locais, por exemplo, descarga fluvial, e remotas, por exemplo, circulação atmosférica. As massas de água predominantes na região são: 1) Água Costeira - AC; 2) Água Tropical - AT; 3) Água Central do Atlântico Sul - ACAS, e ocasionalmente também é possível a presença de água da 4) Convergência Subtropical - CS. A AC apresenta temperatura variável em função da época do ano, com salinidade normalmente inferior a 34‰, e em períodos de maior descarga fluvial, inferior a 30‰; a Água Tropical é originária da Corrente do Brasil, apresentando temperatura superior a 22°C e salinidade superior a 35‰; A Água Central do Atlântico Sul apresenta temperatura inferior a 20°C e salinidade superior a 35‰ (Castro F<sup>o</sup>, 1990; Carvalho & Schettini, 1996; Castro F<sup>o</sup> e Miranda, 1998; Carvalho et al., 1998). A ACAS ocorre nas camadas inferiores, ressurgindo esporadicamente em função de forçantes meteorológicos associadas com ventos do quadrante norte. A ACAS chega a aflorar na superfície entre a Ilha de Santa Catarina e o Cabo de Santa Marta, porém o mesmo não chega a ocorrer na região de Itajaí, ficando sua presença restrita nas camadas de fundo abaixo de 10 m (Schettini et al., 1998).

A mistura da AT com água proveniente da drenagem continental forma a AC, e caracteristicamente apresenta maiores valores de turbidez, concentração de nutrientes inorgânicos dissolvidos e clorofila-a (Schettini et al., 1998). Em função da grande variabilidade do regime hidrológico do rio Itajaí-açu, o mesmo ocorre com as massas de água costeira formadas, as quais apresentam gradual aumento de salinidade e diminuição da turbidez com aumento da sua idade de formação. A ocorrên-

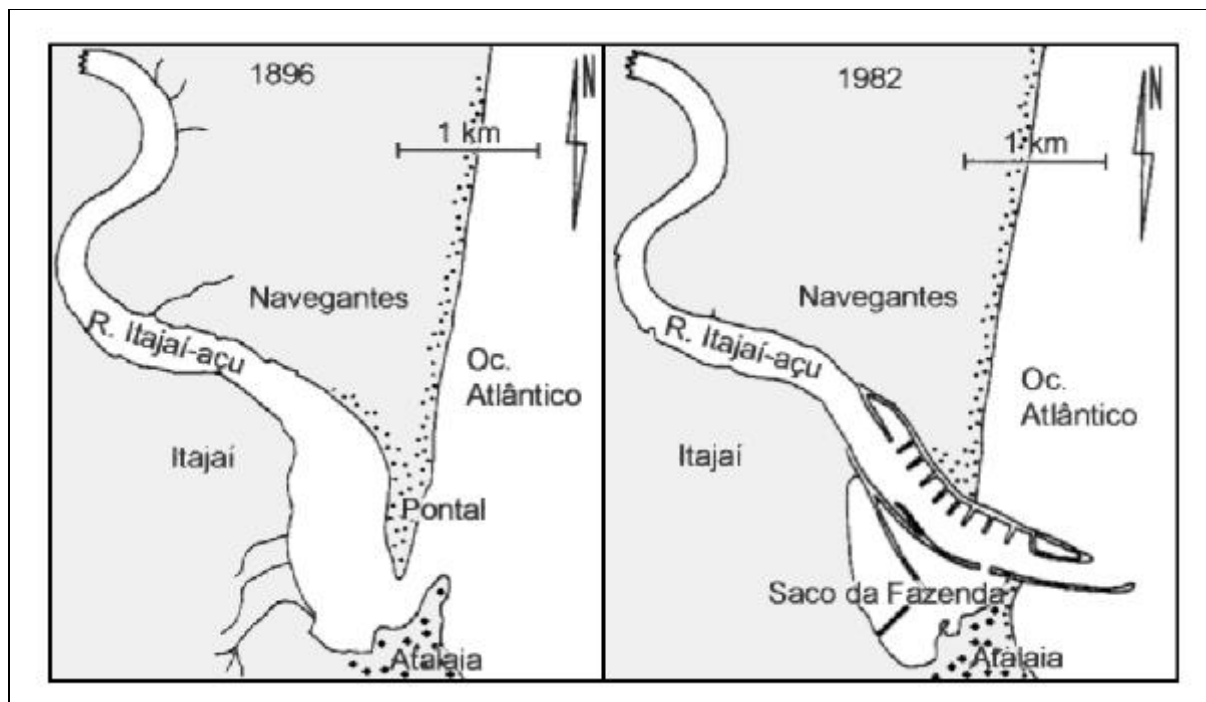


**Figura 3.** O estuário do rio Itajaí-açu, e suas subdivisões em baixo, médio e alto estuário, segundo o esquema proposto por Dionne (1963).

cia de massas de água costeira de diferentes idades são muitas vezes observadas pela presença de frentes marcadas por linhas de detritos. Observações horárias de salinidade e temperatura na Enseada da Armação do Itapocoroy, 20 km ao norte da desembocadura do estuário, mostraram drásticas mudanças decorrentes da passagem de uma frente (Schettini et al., 1999).

## Maré astronômica

O regime de maré astronômica regional é caracterizado como de micromarés misto com predominância semi-diurna. O número de forma, obtido pela razão da soma dos principais constituintes



**Figura 4. Situação da Barra de Itajaí em 1896, antes de qualquer retificação, e em 1982 (modificado de Vargas, 1983).**

semi-diurnos pela soma dos principais constituintes diurnos  $[(M_2 + S_2)/(O_1 + K_1)]$  (Pugh, 1987), é em torno de 0,4 (Schettini et al., 1996). A altura média de maré na desembocadura do estuário é de 0,8 m, com mínimas de 0,3 m durante os períodos de quadratura e 1,2 m durante os períodos de sizígia (Schettini et al., 1998).

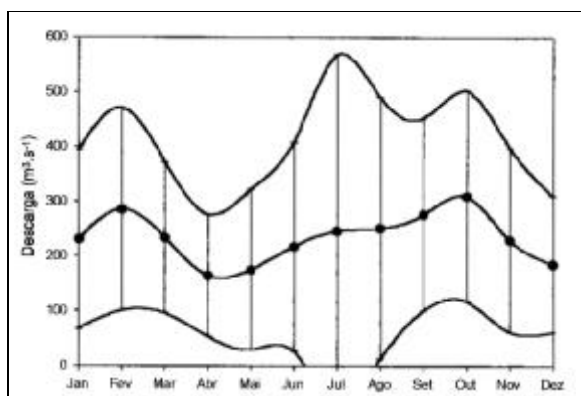
O regime de maré astronômica local é bastante influenciado por constituintes harmônicos de água rasa, possivelmente devido à complexidade da linha de costa e extensão da plataforma continental. A Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) fornece 32 constituintes harmônicos para a estação maregráfica do porto de Itajaí. Destes, 18 são constituintes astronômicos puros, enquanto que os demais são constituintes de águas rasas gerados pela deformação da onda de maré à medida que esta avança sobre a plataforma continental e adentra no estuário (Franco, 1981; Pugh, 1987). O somatório total das amplitudes dos constituintes é 147,7 cm, sendo que 101,2 cm, ou 68%, são devido aos constituintes harmônicos puros.

Os efeitos de água rasa na maré local são evidenciados pela importância dos constituintes de espécie quarti-diurna, com os constituintes  $MK_4$  e  $SK_4$  apresentando equivalência de amplitude com o constituinte principal diurno lunar  $O_1$ , da ordem de 10 cm. A importância dos constituintes quarti-diurnos resulta em um padrão complexo da variação do nível do mar, principalmente durante os períodos de quadratura, quando observa-se quatro preama-

res ao longo de um dia. A distribuição de frequência de níveis extremos em relação ao nível médio (Figura 7), evidencia a complexidade do regime de maré, onde ocorre um padrão bi-modal bastante evidente para os extremos de preamar.

### Marés meteorológicas

A variação do nível do mar decorrente da maré astronômica é influenciado sobremaneira por forçantes meteorológicos locais e remotos. Pressão atmosférica e tensão de cisalhamento do vento são os principais agentes, sendo que o último é consideravelmente mais importante. De modo geral, em observações de longo período a componente meteorológica da oscilação do nível da água conta com 30% da energia total. Em termos conceituais, com a ação de ventos do quadrante norte ocorre a diminuição do nível, ao passo que com a ação de ventos do quadrante sul ocorre o aumento do nível. Sob condições extremas, como observado algumas vezes durante passagens de frentes frias, a sobre-elevação do nível da água por efeitos atmosféricos pode ser da ordem de 1 m em relação ao nível da maré astronômica (Truccolo et al., 1996; Truccolo, 1998).



**Figura 5. Descarga média mensal e desvio padrão do rio Itajaí-açu na estação limnimétrica de Indaial, baseado em dados diários de 1934 até 1999.**

### Progressão de oscilações do nível do mar no estuário

Até a altura da desembocadura do rio Itajaí-mirim, a 8 km da barra, a propagação da onda de maré apresenta um comportamento síncrono, onde os efeitos de diminuição da área da seção transversal do estuário são contrabalanceados com os efeitos friccionais (Nichols & Biggs, 1985), conservando assim a energia e altura da onda de maré, porém com atraso de fase em relação à barra. Neste ponto, a onda de maré apresenta um atraso de fase da ordem de 10° ou 20 minutos, com velocidade de propagação da ordem de 9,5 m.s<sup>-1</sup> (Schettini et al., 1997; Stein & Schettini, 1997).

Análise de registros limnimétricos indicam que a onda de maré se propaga até Blumenau, distante aproximadamente 70 km da barra do estuário, apresentando ali oscilações da ordem de 15 cm durante períodos de sizígia. A oscilação da maré em Blumenau varia em função da descarga fluvial, sendo atenuada até seu desaparecimento em períodos de alta descarga (Schettini & Stein, em preparação). Oscilações do nível do mar causadas por eventos meteorológicos também propagam-se estuário adentro, provocando alterações na hidrodinâmica em escala de tempo supra-mareal (Truccolo et al., 2000).

### Ondas

Ondulações geradas não localmente praticamente não interferem sobre a dinâmica estuarina, uma vez que a barra totalmente retificada e estreita atua como um filtro para altas frequências. Contu-

**Tabela 1. Descarga fluvial média mensal do rio Itajaí-açu para a estação limnimétrica de Indaial, com respectivo desvio padrão e razão desvio padrão: média.**

Mês	Média e desvio padrão (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	Desvio padrão/média
Janeiro	231 ± 163	0,71
Fevereiro	285 ± 185	0,65
Março	233 ± 138	0,59
Abril	164 ± 110	0,67
Maio	175 ± 147	0,84
Junho	217 ± 191	0,88
Julho	245 ± 322	1,31
Agosto	251 ± 239	0,96
Setembro	276 ± 176	0,64
Outubro	309 ± 192	0,52
Novembro	229 ± 168	0,73
Dezembro	185 ± 124	0,67

do, ondas de tempestades certamente desempenham um papel importante na dinâmica dos bancos de areia ao largo da barra.

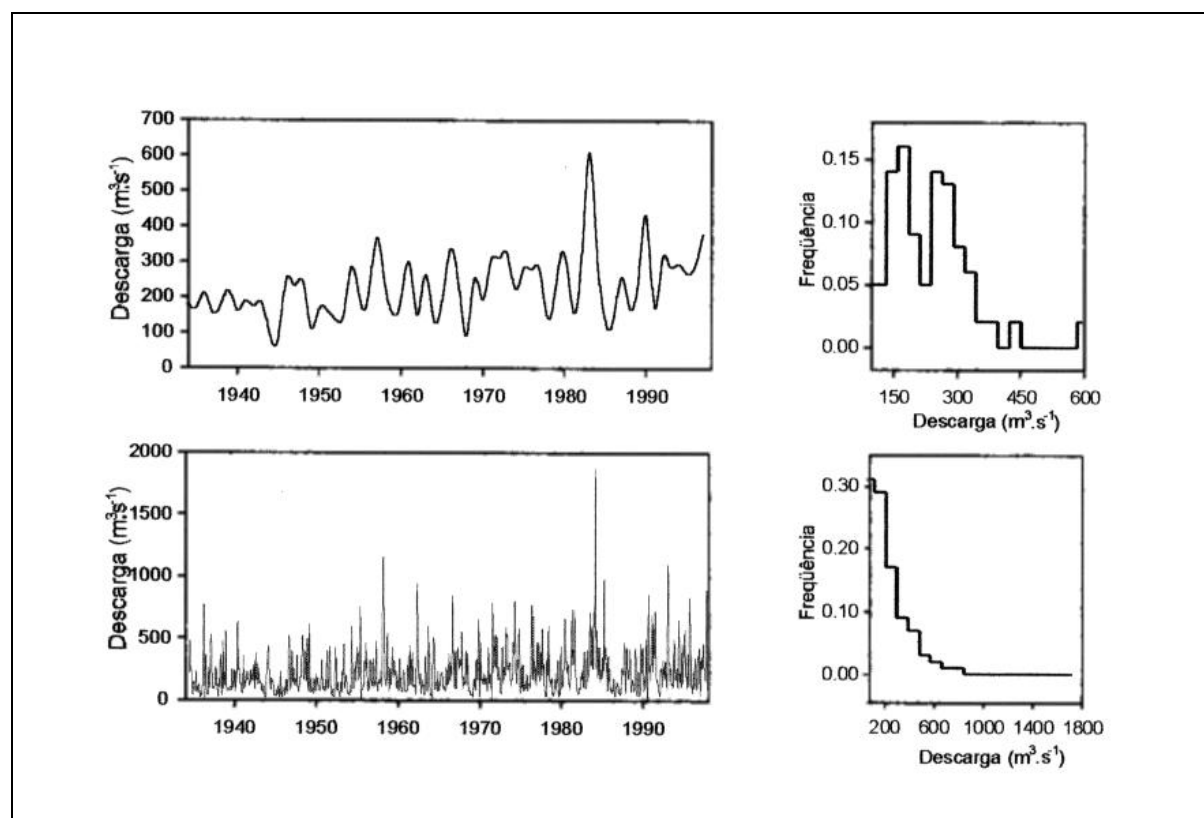
Devido à fisiografia sinuosa do estuário, há trechos alinhados com os ventos predominantes na região formando pistas, ainda que limitadas, para formação de ondas de alta frequência. Em condições críticas, tais ondas podem alcançar até 0,5 m de altura medidas por observação visual, e quando ocorrem no sentido oposto ao escoamento, podem inclusive colapsar. Possivelmente este processo desempenha um papel nos processos de mistura vertical, contudo isto ainda não foi investigado.

### Pluma fluvial

A pluma fluvial do rio Itajaí-açu é uma feição oceanográfica proeminente na linha de costa regional (Figura 8). A pluma é um fenômeno efêmero, resultado dos pulsos de descarga fluvial, tendo sua dimensão e evolução controladas pelo regime hidrológico do rio. Schettini et al. (1998), avaliaram preliminarmente os processos oceanográficos e ecológicos da pluma durante um período de alta descarga fluvial. Nesse estudo foi observado que a pluma se desenvolve prontamente logo após a massa de água estuarina deixar de ter as constrições laterais do estuário. Durante sua evolução ocorrem a rápida diminuição da concentração de sólidos em suspensão e nutrientes inorgânicos dissolvidos, com o rápido incremento de clorofila-a, flora e fauna de organismos planctônicos.

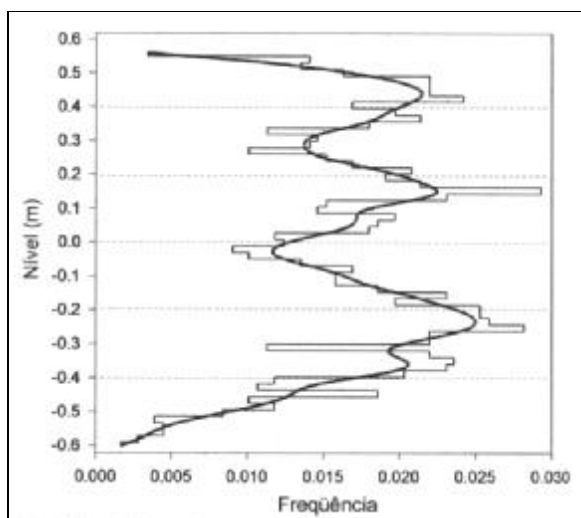
**Tabela 2. Constituintes harmônicos (C.H.) com respectiva amplitude (a) e fase para a estação maregráfica do porto de Itajaí, fornecidos pela Diretoria de Hidrografia e Navegação. Os C.H. em negrito são os ditos astronômicos, e os demais, de águas rasas (Franco, 1981).**

Espécie	C.H.	a (cm)	Fase (°)	Espécie	C.H.	A (cm)	Fase (°)
Longo Período	<b>AS</b>	4,2	55,5	Semi Diurnas	<b>L<sub>2</sub></b>	1,7	75,3
	<b>SSA</b>	5,2	91,7		<b>2N<sub>2</sub></b>	1,4	131,7
	<b>MM</b>	1,9	44,8		MU <sub>2</sub>	1,5	117,0
	<b>MF</b>	6,1	170,4		KJ <sub>2</sub>	1,0	224,5
	<b>MSF</b>	4,3	276,4		MSN <sub>2</sub>	0,7	237,4
Diurnas	<b>K<sub>1</sub></b>	6,1	137,1	Terci Diurnas	<b>OQ<sub>2</sub></b>	0,9	98,9
	<b>O<sub>1</sub></b>	10,4	77,0		<b>M<sub>3</sub></b>	4,2	175,6
	<b>P<sub>1</sub></b>	2,1	126,9		MK <sub>3</sub>	1,6	75,7
	<b>Q<sub>1</sub></b>	3,2	52,7		MO <sub>3</sub>	2,8	335,9
	RO <sub>1</sub>	0,8	83,0		SK <sub>3</sub>	2,1	224,0
	<b>2Q<sub>1</sub></b>	0,7	351,1		SO <sub>3</sub>	1,4	276,4
	<b>S<sub>1</sub></b>	1,3	118,2	Quarti Diurnas	M <sub>4</sub>	5,7	116,4
Semi Diurnas	<b>M<sub>2</sub></b>	23,2	68,8		MS <sub>4</sub>	3,9	205,4
	<b>S<sub>2</sub></b>	15,7	66,4		MN <sub>4</sub>	2,4	67,1
	<b>N<sub>2</sub></b>	4,3	145,5		MK <sub>4</sub>	11,0	205,2
	<b>K<sub>2</sub></b>	5,2	60,1		SK <sub>4</sub>	10,7	227,3



**Figura 6. Descarga média anual e mensal a partir de dados diários de 1934 até 1998, com seus respectivos histogramas de frequência.**





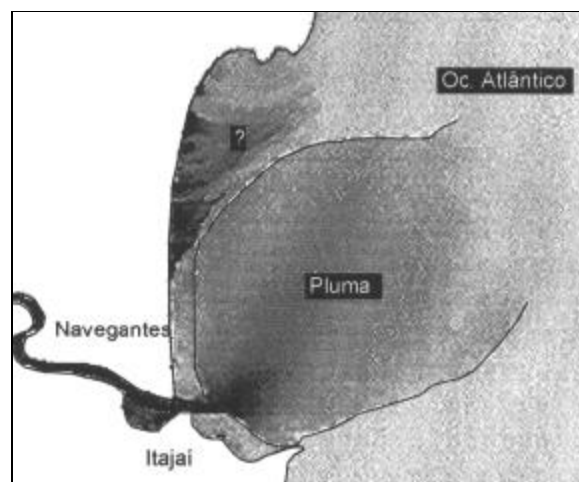
**Figura 7.** Distribuição de frequência de valores extremos de maré astronômica no estuário do rio Itajaí-açu próximo para a estação maregráfica do porto de Itajaí. A linha em negrito representa os dados do histograma filtrados.

A pluma fluvial é restrita aos primeiros metros de coluna de água, porém devido ao arrasto causado pela fricção interfacial da pluma com a água costeira, sua influência estende-se a toda coluna de água. A água costeira subjacente à pluma é deslocada para fora junto com ela, e por continuidade de massa, forma-se uma contra-corrente nas camadas mais profundas. Esta contra-corrente pode induzir a ressurgência localizada de ACAS, caso esta esteja presente nas camadas de fundo. Este complexo padrão de circulação parece manter um corpo de turbidez próximo ao fundo em frente ao estuário (Schettini et al., 1998), e possivelmente parte do material deste corpo de turbidez é carregado de volta para o estuário (Schettini & Carvalho, 1998).

A evolução da pluma sobre a plataforma continental ocorre invariavelmente para norte-nordeste, podendo influenciar a qualidade da água da Enseada da Armação do Itapocoroy, 20 km ao norte. Nesta enseada há intensa atividade de cultivo de moluscos marinhos, e possivelmente este mecanismo seja um dos responsáveis pelo sucesso desta atividade naquele local (Schettini et al., 1999).

## INFLUÊNCIA ATMOSFÉRICA

A influência atmosférica sobre o estuário do rio Itajaí-açu se dá principalmente por meios indiretos: pela atuação dos ventos sobre o oceano gerando anomalias do nível do mar, como já comentado anteriormente, ou pelo balanço hidrológico sobre a bacia



**Figura 8.** Imagem de satélite TM-Landsat (agosto de 1994), tratada e em negativo, mostrando a pluma fluvial do rio Itajaí-açu evoluindo por sobre a plataforma continental.

de drenagem controlando o aporte fluvial. Tanto a ação direta dos ventos quanto o balanço entre precipitação e evaporação através do espelho de água do estuário são praticamente desprezíveis para a hidrologia e hidrodinâmica do sistema.

## Clima

O clima local é classificado como mesotérmico úmido sem déficit hídrico durante o ano. A temperatura média anual é 21,8°C, com precipitação média anual de 1.416 mm, e evapotranspiração média anual de 1.080 mm, resultando em um superávit hídrico médio de 336 mm (GAPLAN, 1986). Similar ao ocorrido sobre a influência fluvial, este quadro apresenta-se bastante variável ao longo do ano, bem como ao longo dos anos devido à influência de fenômenos de escala planetária, por exemplo, El Niño, sobre o regime climático local.

## Regime de ventos

Os ventos de nordeste predominam durante todo o ano, com aumento de importância dos ventos provenientes do quadrante sul durante o inverno e primavera em função do aumento da frequência e intensidade de frentes frias que passam por Santa Catarina (Truccolo, 1998). Na zona costeira em frente ao vale o fenômeno de brisa marinha é observado com bastante frequência. Análise espectral dos dados de vento indicam uma forte componente com período de 24 horas, e um sinal

similar também foi observado para temperatura da água na Armação do Itapocoroy. Estes resultados indicam que a brisa marinha local desempenha um papel não desprezível na hidrodinâmica das massas de água sobre a plataforma interna adjacente à barra do estuário (Schettini et al., 1999).

A Figura 9 mostra a distribuição polar do vento para a estação meteorológica do aeroporto de Navegantes no ano de 1996. Observa-se concentrações de frequência de ventos mais intensos da ordem de  $7,5 \text{ m.s}^{-1}$  provenientes de nordeste e leste e de sul e sudeste. Contudo predominam em termos de frequência ventos fracos de menos de  $2,5 \text{ m.s}^{-1}$  com os mesmos sentidos dos ventos mais intensos, e também de ventos provenientes de oeste, indicando o regime de brisa marinha.

## HIDRODINÂMICA ESTUARINA

### Intrusão da cunha salina

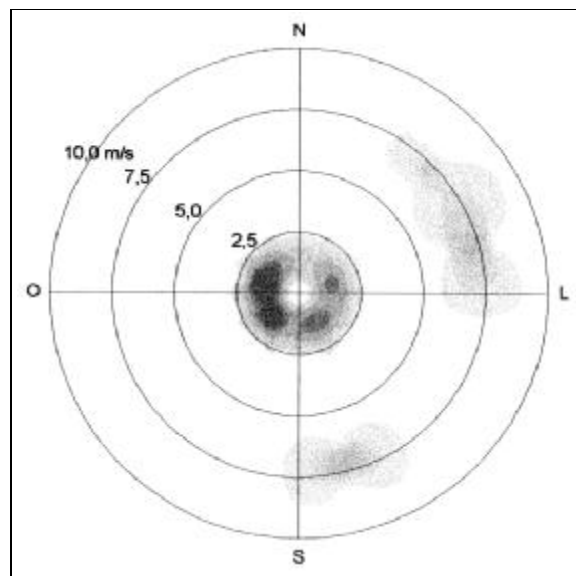
Os primeiros estudos sobre a hidrodinâmica do estuário foram realizadas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias (INPH). Estes estudos demonstraram que a penetração de água salgada para o interior da bacia estuarina varia ao longo do tempo de acordo com a variação do regime de descarga fluvial. Em condições de descarga em torno de  $300 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ , a penetração de água marinha alcança aproximadamente 18 km a montante da barra. Com o aumento da descarga para valores superiores a  $1.000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ , a água salgada é totalmente expulsa da bacia estuarina (Döbereiner, 1985). Através do monitoramento semanal da distribuição da salinidade ao longo do estuário, Schettini e Truccolo (1999a), com 48 campanhas amostrais ao longo do estuário, modelaram empiricamente a extensão da intrusão salina EC [km] em função da descarga fluvial, Q [ $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ ] por:

$$EC = -1,72 + 32,69 e^{(-0,00217 Q)} \quad (1)$$

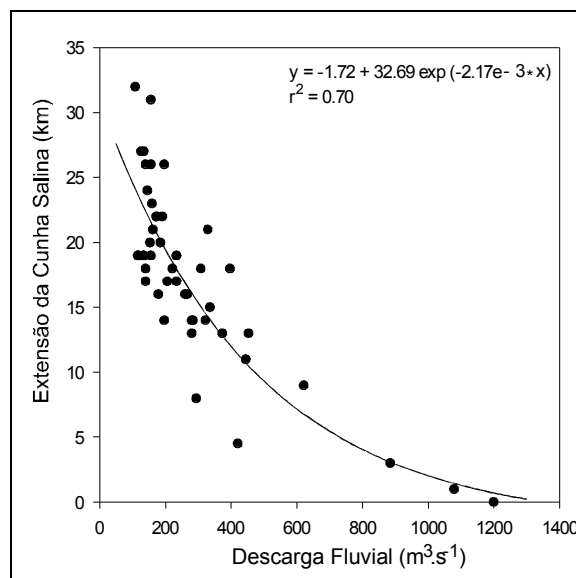
com um coeficiente de explicação  $r^2 = 0,70$  (Figura 10). A boa concordância da resposta da extensão da cunha salina em função da descarga fluvial evidencia a importância do papel da última como principal controlador da hidrodinâmica estuarina.

### Classificação

Durante condições de descarga fluvial intermediárias, em torno de  $500 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ , ou abaixo dis-

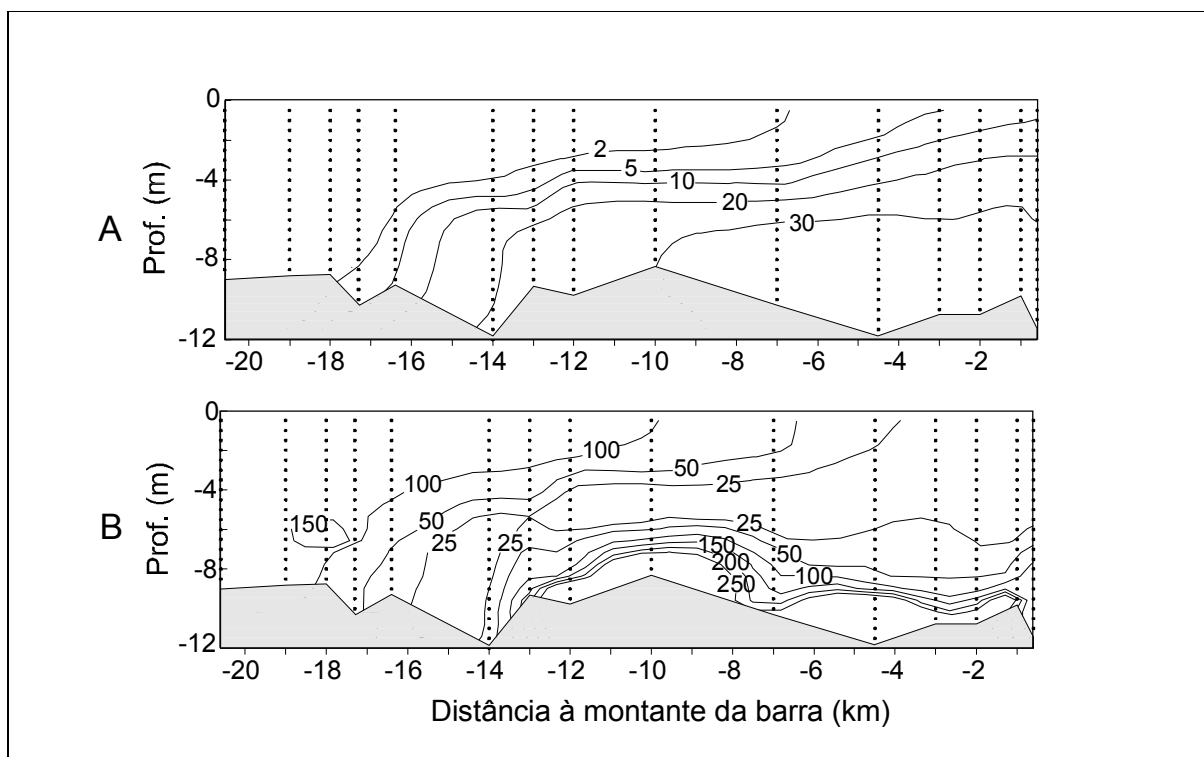


**Figura 9.** Distribuição polar do vento para a estação meteorológica do aeroporto de Navegantes no ano de 1996. Notação meteorológica, não vetorial.



**Figura 10.** Relação entre a descarga fluvial do rio Itajaí-açu e a extensão da cunha salina (segundo Schettini & Truccolo, 1999a).

so, o estuário apresenta uma evidente cunha salina (Figura 11). Nestas condições o estuário é como do tipo cunha salina de acordo com os padrões de distribuição de sal descritos por Pritchard (1955), sendo esta corroborada com a classificação de Hansen & Rattray (1966) (Figura 12). A classificação de Pritchard baseia-se na distribuição de sal no estuário.



**Figura 11. Exemplo de perfis verticais/longitudinais ao longo do estuário do rio Itajaí-açu de salinidade (‰, A), e concentração de sedimentos em suspensão (mg.l<sup>-1</sup>, B). Este perfil foi realizado no dia 5 de março de 1999, com descarga fluvial de 233 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>.**

rio, e a classificação de Hansen & Rattray baseia-se em parâmetros de circulação (abscissa) e estratificação (ordenada). O parâmetro de circulação é obtido pela razão da velocidade devido à descarga fluvial pela velocidade residual total próximo da superfície. O parâmetro de estratificação é obtido pela razão da diferença entre a salinidade de fundo e de superfície pela salinidade média da coluna de água, todos os valores sendo promediados para ciclos completos de maré.

Os dados utilizados para classificar o estuário segundo Hansen & Rattray (1966), foram obtidos em três campanhas distintas (novembro de 1994, sizígia; junho de 1995, sizígia e quadratura), abrangendo dois ciclos de maré (25 horas), e em duas estações sinópticas: uma próximo à desembocadura e a outra 12 km para montante. Informações de velocidade e direção de corrente foram obtidos com o fundeio de correntógrafos, e dados de salinidade foram obtidos com perfis verticais a cada hora (Schettini & Carvalho, 1998b). As seis condições amostradas ficaram agrupadas no canto esquerdo superior do diagrama (Figura 12), na zona de transição entre altamente estratificado e cunha salina. Pouca diferença é observada entre a estação próximo da desembocadura (baixo estuário), com a estação a montante (médio estuário), sugerindo o

predomínio de processos advectivos na hidrodinâmica estuarina (Schettini et al., 1996).

A condição estratificada se deve principalmente ao fato de que este sistema apresenta um número de Froude barotópico reduzido,  $\approx 0,1$ , dado pela razão da amplitude de maré pela profundidade média. Em termos de escala, isto indica que o papel da fricção das paredes e do fundo da bacia estuarina na propagação da onda de maré é secundário, sabendo-se que este é o principal mecanismo gerador de macro-turbulência atuante na quebra da haloclina e promovedor da mistura vertical (Dyer, 1990). A pouca fricção lateral e a uniformidade do canal do estuário também explicam o comportamento síncrono da propagação da maré, e o fato desta alcançar a altura de Blumenau.

### Modos de transporte de sal

Os modos de transporte sal foram calculados segundo a decomposição proposta por Kjerfve

(1986), e os resultados apresentados preliminarmente por Schettini et al. (1997). Considerando que o fluxo total de sal  $F$  por unidade de seção [ $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ] de profundidade  $p$  é obtido por:

$$F = \int_0^p u S dz \quad (2)$$

onde  $u$  é a componente longitudinal da velocidade (positiva para montante e negativa para jusante),  $S$  é a salinidade, e  $z$  é a coluna de água. Tanto a velocidade quanto a salinidade podem ser expressas como variações espaciais e temporais de um valor médio como:

$$\begin{aligned} u &= \bar{u} + \langle \bar{u} \rangle + u' \\ S &= \bar{S} + \langle \bar{S} \rangle + S' \end{aligned} \quad (3)$$

onde a barra denota média espacial vertical, os valores dentro de  $\langle \rangle$  são promediados para ciclos completos de maré, e o apóstrofo denota o desvio em relação à média vertical, e substituindo na Equação (2) e integrando no tempo,  $F$  pode ser expresso por:

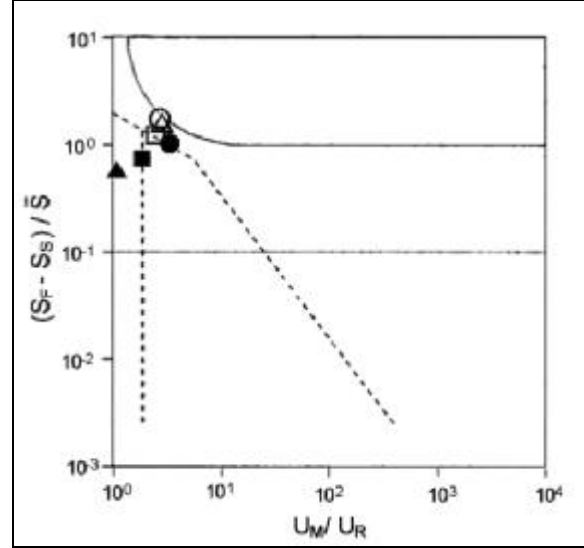
$$\langle F \rangle = \langle p \bar{u} \bar{S} \rangle \quad (4)$$

e o lado direito da Equação (2) pode ser reescrito como:

$$\begin{aligned} \langle F \rangle &= \langle p \rangle \langle \bar{u} \rangle \langle \bar{S} \rangle + \\ &\quad \langle p u' S' \rangle + \\ &\quad \langle \bar{u} \rangle \langle p S' \rangle + \\ &\quad \langle \bar{S} \rangle \langle p u' \rangle + \\ &\quad \langle p u' S' \rangle + \\ &\quad \langle p u' S' \rangle \end{aligned} \quad (5)$$

O primeiro termo do lado esquerdo da Equação (5) representa o transporte advectivo devido à descarga fluvial; o segundo, terceiro e quarto termos, o transporte devido aos efeitos da maré; o quinto termo, devido ao cisalhamento vertical; o sexto termo, devido à turbulência (Kjerfve, 1986).

Utilizando os dados obtidos na campanha de 25 horas de sizígia realizada em junho de 1996, obteve-se que os mecanismos de transporte são bastante similares na desembocadura, Estação #1, e a 12 quilômetros para montante, Estação #2 (Tabela 3). Nota-se também que os termos devido às marés são desprezíveis, com exceção do 3º termo,



**Figura 12.** Condição do estuário do rio Itajaí-açu no diagrama de circulação/estratificação de Hansen & Rattray (1966): Próximo da desembocadura: figuras vazias; 12 km à montante: figuras vazias; Círculos: sizígia, novembro de 1994; Quadrados: quadratura, junho de 1995; Triângulos: sizígia, junho de 1995 (Schettini et al., 1997).

associado com a deriva de Stokes, porém mesmo assim bem inferior aos demais. Todos os termos na Estação #1 foram positivos, indicando transporte para montante, e na Estação #2 somente o termo de cisalhamento vertical ( $5^\circ$ ) apresentou sinal negativo. Estes resultados estão associados à condição de baixa descarga em que foi realizada a campanha ( $\sim 170 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ), resultando em um transporte geral para montante, assim como o transporte para jusante do termo de cisalhamento vertical está associado ao processo de intrusão salina no médio estuário.

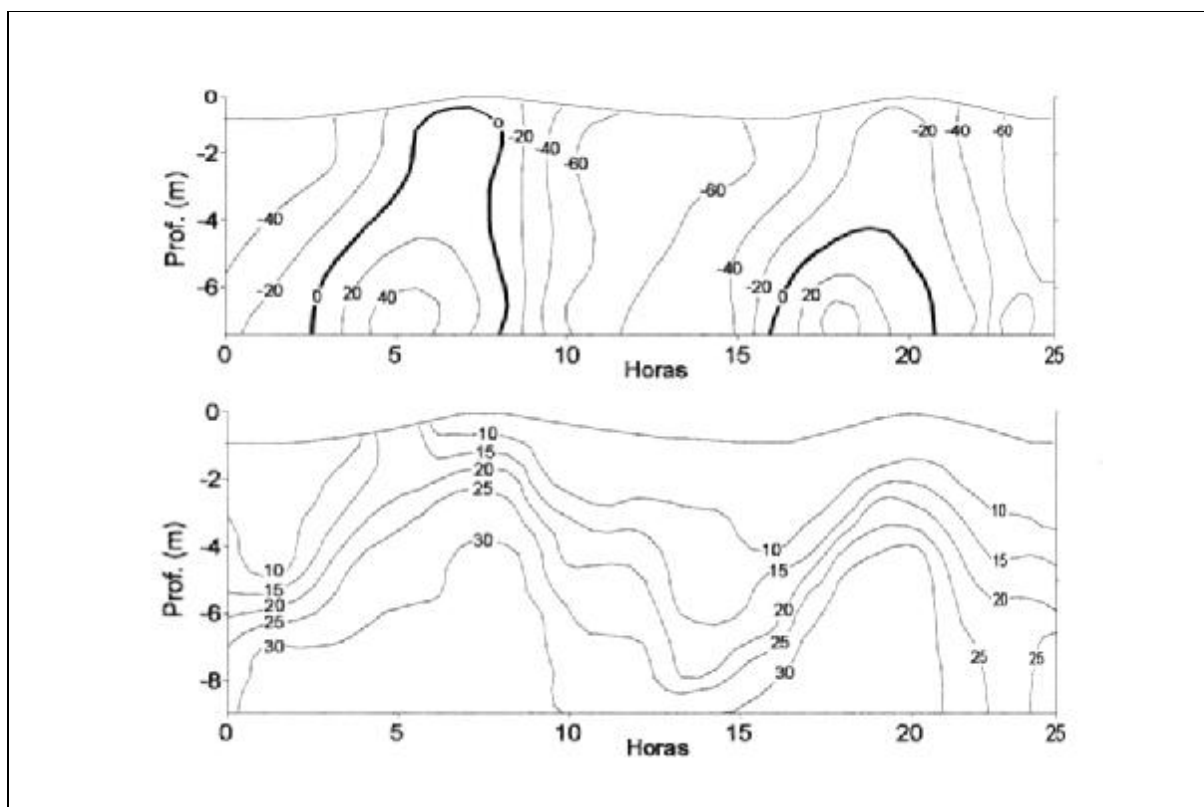
## Variabilidade intramareal

Observações durante ciclos de marés mostram que os padrões do campo de velocidade de corrente longitudinal e de salinidade apresentam-se bastante regulares durante períodos de descarga próximos da média, com períodos definidos de enchente e de vazante até distâncias superiores a 12 km da barra (Figuras 13 e 14; Schettini et al., 1995).

Durante as fases de enchente e vazante o escoamento instantâneo apresenta-se uni-direcional, ocorrendo inversão de correntes na coluna de água apenas após as estofas de preamar e baixamar. Durante condições de baixa descarga fluvial, quando o regime de correntes é dominado pela maré, as cor-

**Tabela 3. Resultado da decomposição do transporte de sal, segundo Kjerfve (1986). A Estação #1 é próximo à desembocadura e a Estação #2 é 12 km a montante. F é o fluxo total obtido pela Equação (4), e os demais são os termos do lado esquerdo da Equação (5). Todos os valores em  $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ .**

Estação	F	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª
# 1	6,83	0,66	0,01	0,04	0,00	2,43	3,69
# 2	6,22	0,84	0,01	0,16	0,00	-0,54	5,75



**Figura 13. Campo de velocidade de corrente longitudinal (em cima) e de salinidade (em baixo) ao longo do tempo próximo da barra do estuário.**

rentes máximas observadas durante sizígia e quadratura são da ordem de 0,9 e 0,4  $\text{m.s}^{-1}$ , respectivamente. Sob condições de descarga fluvial elevada, a velocidade de corrente é controlada diretamente pela vazão, podendo atingir valores superiores a 2  $\text{m.s}^{-1}$ .

Reversões de correntes na coluna de água são observadas somente nos períodos próximos da preamar e da baixamar. Durante estes períodos podem ocorrer gradientes verticais da ordem de 0,6  $\text{m.s}^{-1}$  em condições de sizígia, por exemplo, 0,3  $\text{m.s}^{-1}$  para jusante na superfície e 0,3  $\text{m.s}^{-1}$  para montante a um metro acima do fundo.

Em termos de distribuição vertical e longitudinal de sal, as variações intramareaais mais significativas estão associadas com a intrusão advectiva da água costeira, considerando a salinidade de 30‰ como limite entre água de mistura interna e água costeira. Em condições de maré média, por exemplo,

0,8 m, a intrusão de água costeira no estuário pode variar em 8 km entre a baixamar e a preamar. Por outro lado, considerando também a água de mistura interna, e a salinidade de 2‰ como limite de separação da água fluvial, a variação da extremidade da cunha é de apenas 1 km entre baixamar e preamar (Figura 15; Schettini & Truccolo, 1999b).

### Circulação secundária

Devido à relativa pouca largura do estuário associado com uma profundidade considerável, as

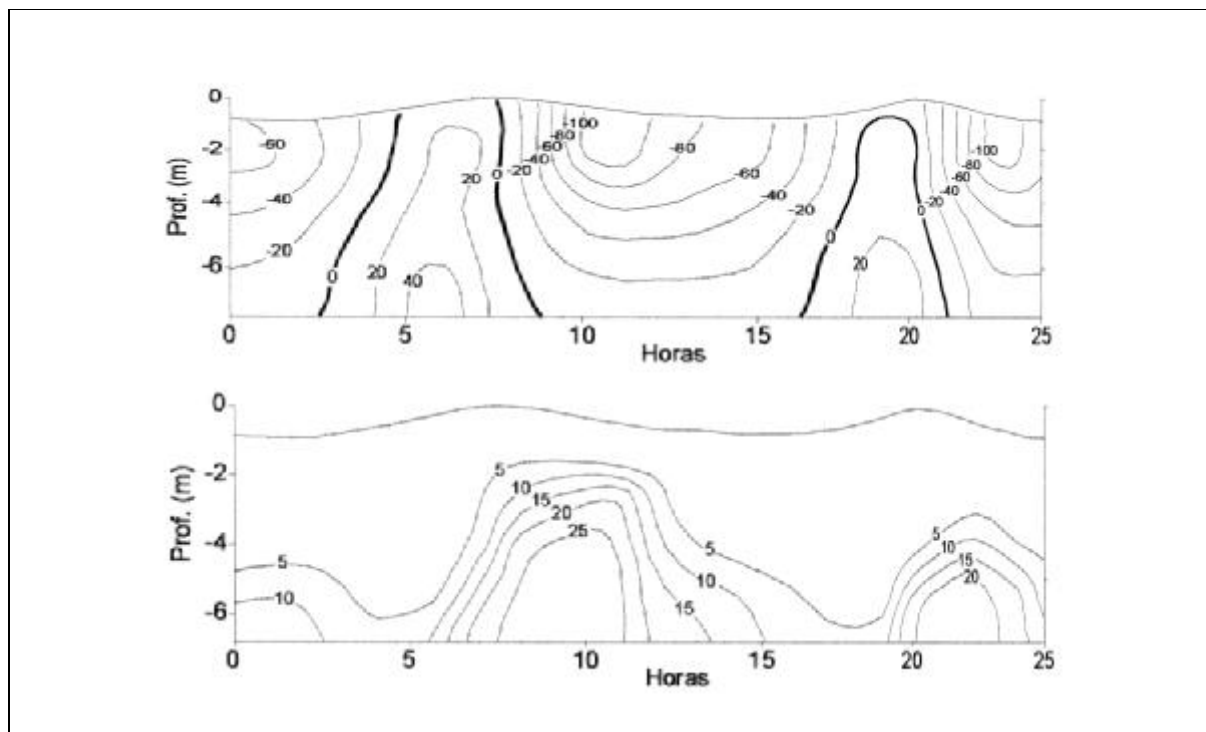


Figura 14. Campo de velocidade de corrente longitudinal (em cima) e de salinidade (em baixo) ao longo do tempo a 12 km a montante da barra do estuário.

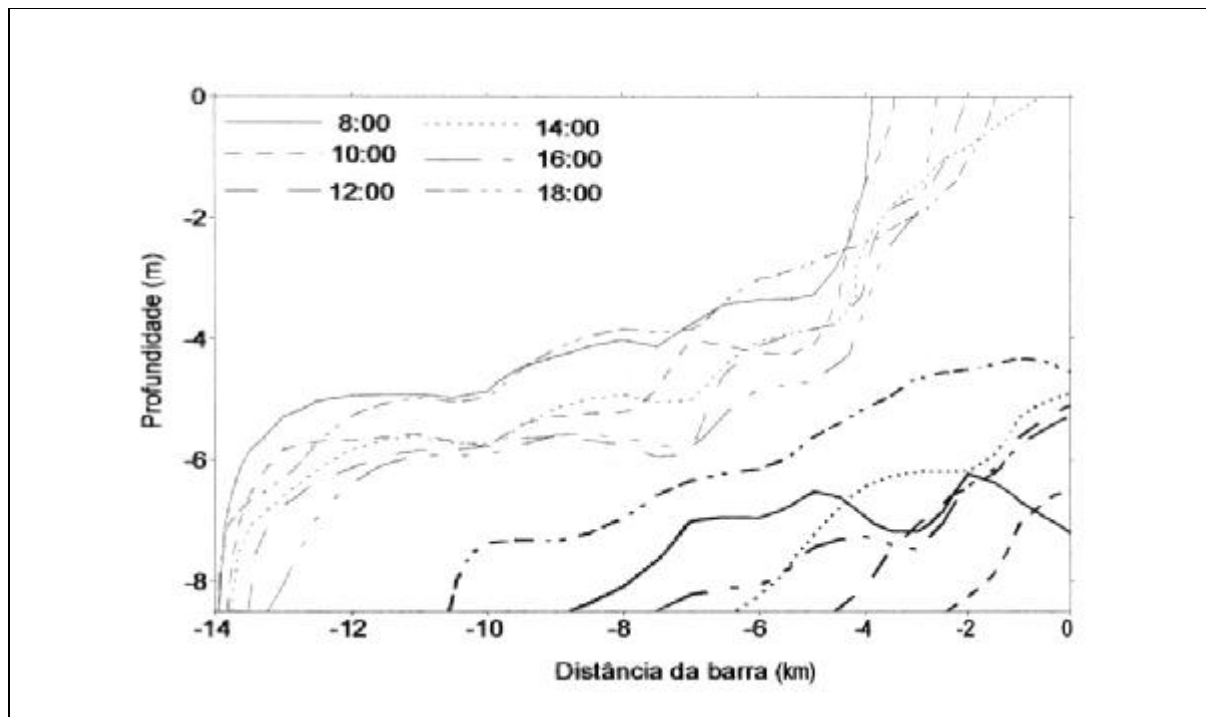


Figura 15. Variação intramareal da distribuição longitudinal/vertical de salinidade, no dia 22 de janeiro de 1999, sob condição de maré média  $\sim 0,8$  m. As linhas finas representam isolinhas de salinidade 2‰, e as linhas em negrito representam isolinhas de salinidade 30‰ ao longo de um ciclo de maré (modificado de Schettini & Truccolo, 1999b).

condições hidrodinâmicas podem ser aproximadas de uma situação lateralmente homogênea. Porém, a presença de meandros produz uma variabilidade lateral dos regimes de escoamento, induzindo uma componente transversal significativa nas extremidades destes.

A Figura 16 apresenta a distribuição residual para um ciclo de maré de correntes e salinidade, adquiridos em três estações através de uma seção localizada na curva do primeiro meandro do estuário a partir da desembocadura. Observa-se uma intensificação das correntes de superfície para a margem de Itajaí, enquanto que próximo ao fundo a corrente residual apresenta sentido para montante para o lado da margem de Navegantes, com reflexos sobre a distribuição de salinidade. Certamente a presença dos meandros deve desempenhar um papel no processo de mistura de águas.

## ASPECTOS SEDIMENTOLÓGICOS

### Sedimentos de fundo

Estudos iniciais sobre os processos sedimentológicos no estuário do rio Itajaí-açu foram realizados por Ponçano (1982 e 1987), avaliando a distribuição faciológica dos sedimentos de fundo na região de interesse do porto de Itajaí. Este autor verificou que a faciologia do sistema varia em função do tempo, respondendo ao regime de descarga fluvial do rio Itajaí-açu. Durante os períodos de descargas mais baixas os sedimentos de fundo do estuário são dominados por siltes e argilas, ao passo que durante períodos de descargas mais elevadas (por exemplo  $700 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ) aumenta o teor de areia nos sedimentos de fundo decorrente do transporte fluvial. Durante períodos de baixa descarga observa-se também um aumento de areia fina de origem marinha, denotando um transporte deste material pelas correntes de fundo do estuário (Döbereiner, 1986). Embora variável espacial e temporalmente, os sedimentos na bacia estuarina até 7 quilômetros a montante da barra são dominados pela fração argila (Figura 17), subtendendo-se a dominância de processos de sedimentos coesivos de transporte, sedimentação, consolidação e erosão dos sedimentos estuarinos.

### Descarga sólida em suspensão

A principal fonte de sedimentos para o estuário do rio Itajaí-açu é a drenagem continental através da descarga sólida por suspensão de sedimentos finos e tração e saltação de sedimentos arenosos. Apesar da intensa atividade de extração de areia ao longo do estuário, ainda não há estudos para quantificar o aporte de sedimentos arenosos,

bem como seu transporte através do estuário para a zona costeira. Contudo, considerando a continuidade da atividade, o aporte deve ser considerável. É possível que a contínua extração de areia durante as últimas décadas esteja afetando o balanço sedimentar ao longo da costa, sendo que atualmente observa-se regiões onde está havendo problemas com erosão, como por exemplo, a praia do Gravatá.

A descarga sólida por suspensão no rio Itajaí-açu vem sendo monitorada diariamente na estação fluviométrica de Indaial desde novembro de 1998. A concentração de sedimentos em suspensão observada varia em função das condições de descarga fluvial, podendo ser tão baixa quanto  $7 \text{ mg.l}^{-1}$  durante períodos prolongados de baixa descarga, ou superior a  $500 \text{ mg.l}^{-1}$  durante extremos de descarga, por exemplo  $1000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ . A Figura 18 apresenta a curva de descarga sólida em suspensão, DSS [ $\text{ton.dia}^{-1}$ ], para o rio Itajaí-açu na estação fluviométrica de Indaial, onde esta responde linearmente à descarga,  $Q [\text{m}^3.\text{s}^{-1}]$  líquida através de:

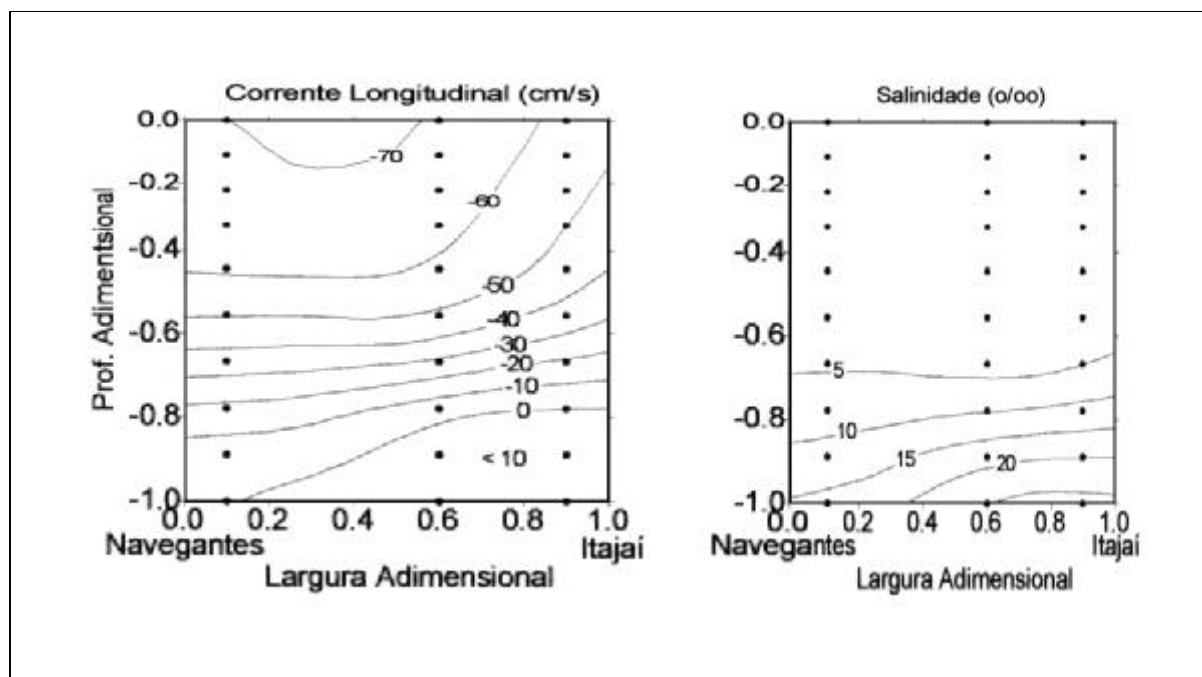
$$\text{DSS} = -5137 + 28,8 Q \quad (6)$$

com  $n = 380$  e coeficiente de explicação  $r^2 = 0,77$ .

Eventos de alta descarga fluvial são responsáveis pela maior parte da descarga sólida por suspensão. Durante o período de novembro de 1998 até novembro de 1999, a descarga sólida por suspensão total foi de 760.000 toneladas de sedimentos finos. Durante este período ocorreram somente três eventos hidrológicos extremos, resultando em um total de 9 dias, ou 2,5% do tempo, com descarga superior a  $1000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ . A descarga sólida por suspensão nestes dias totalizou 312.000 toneladas, representando 41% do total de sedimentos finos carregados pelo rio.

### Balanço e distribuição de sedimentos em suspensão

Durante períodos prolongados de baixa descarga fluvial, por exemplo, mais de 60 dias, o transporte de sedimento pelas correntes de fundo do estuário para montante pode exceder a D.S.S., resultando em importação residual de sedimentos da plataforma interna (Schettini & Carvalho, 1998).



**Figura 16. Distribuição lateral da velocidade de corrente longitudinal (positivo: entrando, negativo: saindo) e salinidade em um extremo de meandro do estuário do rio Itajaí-açu. Dados promediados para um ciclo de maré.**

Estuários do tipo cunha salina, como é o caso do sistema em questão, são predominantemente exportadores de sedimentos para a plataforma continental adjacente (Shubel & Carter, 1984; Dyer, 1986 e 1995). Em função da condição altamente estratificada e dominância dos processos advectivos de transporte com pouca mistura da água doce com a água marinha, a maior parte dos sedimentos que aportam pelo alto estuário passam pelo estuário sendo diretamente exportados para a plataforma adjacente. Isto pode ser observado pela distribuição de sedimentos em suspensão no estuário, onde as isolinhas de concentração tendem a acompanhar a distribuição de salinidade ao longo do estuário. Em termos médios, 70% da D.S.S. é exportada diretamente para a plataforma interna. Entretanto, a taxa de retenção de sedimentos varia significativamente em função da descarga, variando inversamente com esta. Nos períodos em que a descarga excede  $1000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , e a cunha salina é completamente expulsa da bacia estuarina, a retenção é nula, ao passo que durante períodos de baixa descarga, a retenção pode chegar próximo de 100% (Schettini, 2000b).

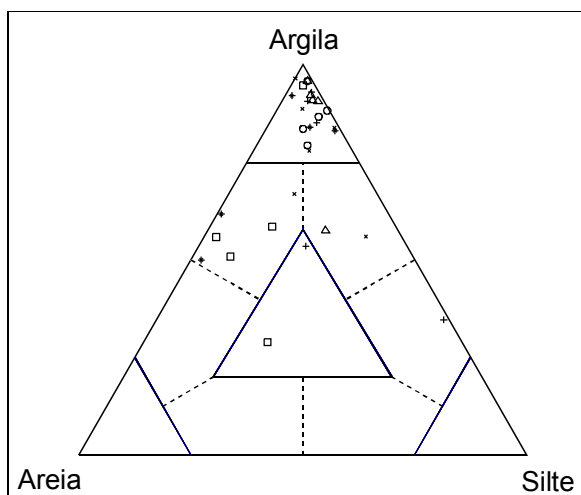
Os sedimentos em suspensão que aportam no estuário a partir da descarga fluvial são na sua maior parte argilosos, apresentando carga elétrica

negativa e ocorrendo na forma de flocos e agregados de material inorgânico e matéria orgânica. Em função da maior ou menor mistura de massas de água, da concentração de sedimentos e de matéria orgânica, além de outros fatores, complexos processos de floculação e defloculação podem ocorrer (Kranck, 1984; Eisma, 1986). Embora tais processos ocorram no estuário, acredita-se que estes desempenhem um papel menor na dinâmica de sedimentos em suspensão, e a advecção fluvial seja o principal responsável pelo balanço de material no estuário (Schettini, 2001). Em mais de sessenta levantamentos de distribuição de sedimentos em suspensão no estuário, desde a desembocadura até pouco mais da montante do limite de intrusão salina, poucas vezes observou-se uma nítida zona de turbidez máxima. A ausência da zona de turbidez máxima no estuário é um fato que corrobora com a hipótese da dominância da advecção no transporte de sedimentos em suspensão.

### Dragagens no estuário

Há registros de dragagens no rio Itajaí-açu desde 1895. No entanto, estas se tornaram mais freqüentes e significativas após os anos 60 com o incremento do comércio marítimo, estando restritas

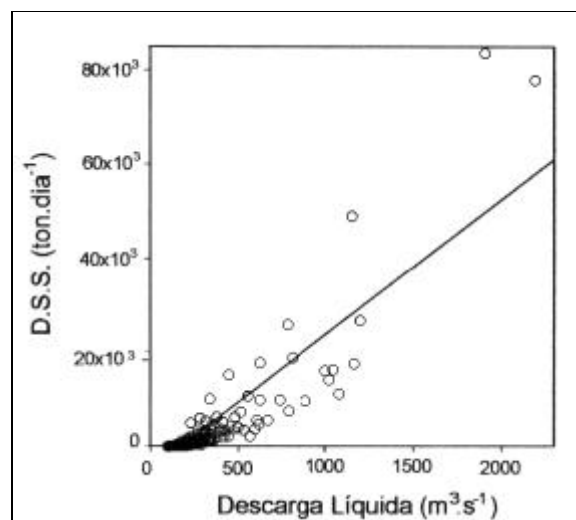




**Figura 17. Diagrama de Shepard com a classificação de amostras de sedimento de fundo do estuário do rio Itajaí-açu ao longo do canal até 7 km a montante da barra. Os diferentes sinais representam diferentes campanhas de coleta.**

principalmente no baixo estuário na região de interesse do porto de Itajaí. Em 1978 foi realizada a primeira dragagem de aprofundamento do canal de acesso ao porto, com a cota de -6,5 m, sendo esta posteriormente reduzida para -8,0 em 1983, e para -9,5 em 1996 (Carvalho, 1996). Com o aumento da profundidade e alteração da área da seção transversal, o volume de material dragado para manutenção da profundidade desejada aumentou de 50.000 m<sup>3</sup> nos anos 70, 250.000 m<sup>3</sup> nos anos 80, para 840.000 m<sup>3</sup> nos anos 90, representando um aumento exponencial do volume dragado em função da diminuição da cota operacional. Atualmente a cota do canal de acesso é mantida em -11,0 m, e há intenção das autoridades portuárias para aprofundar ainda mais.

As dragagens de aprofundamento e manutenção até 1998 foram realizadas com dragas de cisternas, transportando o material para zonas de despejo na plataforma interna. Desde 1998 a dragagem de manutenção da bacia de evolução e do canal de acesso ao porto de Itajaí vem sendo realizada por uma draga que utiliza um sistema de injeção de água. Este sistema funciona pelo princípio de que quando se fluidifica o sedimento fino que constitui o fundo pela injeção de água, este diminui sua densidade pelo ganho de volume e adquire energia potencial pela elevação em relação ao seu estado inicial. A energia potencial, por sua vez, converte-se em energia cinética criando uma corrente de gravidade, levando o material para regiões mais



**Figura 18. Relação entre a descarga sólida em suspensão (D.S.S., ton.dia<sup>-1</sup>) com a descarga líquida (m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>) do rio Itajaí-açu na estação limnimétrica de Indaial.**

baixas. Em termos práticos, esta técnica vem funcionando adequadamente, porém observa-se que quando é utilizada durante períodos de baixa descarga fluvial uma fração do material remobilizado é transportado para montante, possivelmente devido ao incorporamento deste material na corrente de fundo para montante (Schettini, 2000a).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estuário do rio Itajaí-açu, em função de sua importância econômica e de suas características fisiográficas simples, o que facilita as questões logísticas relacionadas ao levantamento de dados primários, talvez seja um dos estuários mais bem compreendidos no Brasil no que diz respeito à sua hidrodinâmica e dinâmica de sedimentos finos (outro seria a lagoa dos Patos). Contudo, mesmo assim existem inúmeras questões ainda a serem avaliadas, sendo algumas de interesse mais econômico e outras mais de cunho científico.

As dragagens na região de interesse do porto de Itajaí talvez representem o aspecto mais importante economicamente, uma vez que é através deste que ocorre o escoamento de grande parte dos bens produzidos no Vale do Itajaí e regiões vizinhas. As dragagens são uma necessidade constante para manutenção de profundidades compatíveis com os navios que trafegam no estuário. Acredita-se que o processo de assoreamento contínuo do baixo estuário esteja diretamente associado com o

aporte de sedimentos em suspensão do rio. Contudo, alguns resultados apresentados neste artigo apontam para um cenário mais complexo, onde as correntes de fundo para montante desempenham um papel importante no carreamento de sedimentos finos da plataforma interna para o interior do estuário. Este sedimento possivelmente foi exportado pelo estuário para a plataforma, e por algum processo fica retido na plataforma (por exemplo, Schettini et al., 1998), permitindo que uma parte retorne. Talvez este processo seja mais importante no assoreamento do que a sedimentação direta da suspensão que chega através do rio (Schettini, 2001).

A influência do rio Itajaí-açu na região costeira é bastante expressiva, porém somente alguns poucos estudos avaliando isto já foram realizados, sendo que principalmente em caráter descritivo (por exemplo, Schettini et al., 1998). Além das implicações da dinâmica de sedimentos na plataforma, como descrito acima, também há a questão do desenvolvimento da maricultura regional. Ao norte da sua desembocadura está localizada a Enseada da Armação do Itapocoroy, onde a atividade de maricultura vem se desenvolvendo expressivamente desde o início dos anos noventa do século passado. A sustentabilidade desta atividade está diretamente ligada à qualidade da água costeira, tanto no que diz respeito ao fornecimento de alimento para os organismos quanto na ausência de contaminantes. É possível que balanço e exportação de sedimentos e nutrientes do estuário do rio Itajaí-açu esteja diretamente associado ao sucesso desta atividade naquele local (Schettini et al., 1999), contudo estudos adicionais devem ser levados a cabo para uma melhor compreensão dos processos envolvidos. Tais estudos deverão possibilitar um equacionamento ideal da quantidade de organismos que possa ser produzida, garantindo assim a sustentabilidade da atividade.

Além destas questões de caráter prático, há também diversas outras questões de caráter mais acadêmico, como por exemplo, explicar de maneira objetiva a ausência de uma zona de turbidez máxima, ou ainda, o papel da alta variabilidade hidrológica do rio Itajaí-açu nos mecanismos de retenção ou exportação de sedimentos. A maior parte dos estudos já realizados são baseados em estratégias amostrais discretas em termos temporais, embora abrangentes em termos espaciais. Somente um programa de observações de alta resolução temporal e espacial das variáveis hidrodinâmicas e sedimentológicas permitirá um aumento significativo da compreensão do funcionamento deste sistema estuarino.

## AGRADECIMENTOS

Agradecimentos são devidos à Eliane C. Truccolo, pela revisão do artigo, e a todas as pessoas envolvidas nas diversas campanhas de campo, processamento de amostras e de dados, os quais geraram as informações apresentadas neste artigo. Agradeço também aos revisores anônimos por suas críticas ao manuscrito.

## REFERÊNCIAS

- BELLOTTO, V.; KUROSHIMA, K. N. & ZACHARJASIEWICZ, I. C. P. (1996). Dinâmica de nutrientes no estuário do rio Itajaí-açu, SC. In: Simpósio sobre Oceanografia, 3, São Paulo, *Resumos*, p.295.
- CAMERON, W. M. & PRITCHARD, D. W. (1963). Estuaries. In: HILL, M. N. ed. *The sea*, vol. 2. New York, John Wiley & Sons, p.306-324.
- CARVALHO, J. L. B. (1996). As dragagens no porto de Itajaí: aspectos econômicos. *Dynamis*, 4(17):76-87.
- CARVALHO, J. L. B. & SCHETTINI, C. A. F. (1996). Contribuição ao estudo da estrutura oceanográfica do litoral centro norte de Santa Catarina. In: Reunião Especial da SBPC, 3, Florianópolis, *Anais*, SBPC, p.406.
- CARVALHO, J. L. B.; SCHETTINI, C. A. F. e RIBAS, T. M. (1998). Estrutura termohalina do litoral centro norte catarinense. *Notas Técnicas da Facimar*, 2:181-197.
- CASTRO F<sup>o</sup>, B. M. (1990). Estado atual do conhecimento dos processos físicos das águas da plataforma continental sudeste do Brasil. In: Simpósio de Ecossistemas Costeiros da Costa Sul e Sudeste do Brasil, 2, Águas de Lindóia, *Anais*, ACIESP, p.1-11.
- CASTRO F<sup>o</sup>, B. M. & MIRANDA, L. B. (1998). Physical oceanography of the western atlantic continental shelf located between 4° N and 34° S coastal segment (4, W). In: Robinson, A. R. & Brink, K. H. (eds.) *The sea*. Vol. 11. New York, John Wiley and Sons, p.209-251.
- DALRYMPLE, R. W.; ZAITLIN, B. A. & BOYD, R. (1992). A conceptual model of estuarine sedimentation. *Journal of Sedimentary Petrology*, 62:1130:116.
- DIONNE, J. C. (1963). Towards a more adequate definition of the St. Lawrence estuary. *Zeitschr. F. Geomorph.*, 7(1):36-44.
- DÖBEREINER, C. E. (1985). *Comportamento hidráulico e sedimentológico do estuário do rio Itajaí, SC*. Rio de Janeiro, INPH, Relatório 700/03, 34 p.
- DÖBEREINER, C. E. (1986). Sedimentação no estuário do rio Itajaí-açu. In: Congresso Latino Americano de Hidráulica, 12, São Paulo, *Anais*, p.1-10.
- DYER, K. R. (1986). *Coastal and estuarine sediment dynamics*. New York, John Wiley and Sons, 342 p.

- DYER, K. R. (1990). *Estuaries: a physical introduction*. New York, John Wiley & Sons, 195 p.
- DYER, K. R. (1995). Sediment transport processes in estuaries. In: Perillo, G. M. E. ed. *Geomorphology and Sedimentology of Estuaries*. New York, Springer-Verlag, p.423-449.
- EISMA, D. (1986). Flocculation and de-flocculation of suspended matter in estuaries. *Netherlands Journal of Sea Research*, 20(2/3):183-199.
- FAIRBRIDGE, R. W. (1980). The estuary: its definition and geodynamic cycle. In: Olausson, E. & Cato, I. (Eds.) *Chemistry and Biogeochemistry of Estuaries*. New York, John Wiley and Sons, p.1-35.
- FLEMING, T. L. (1935). *Relatório da comissão de estudos do porto de Itajaí e rio Cachoeira*. Rio de Janeiro, DNPN.
- FRANCO, A. S. (1981). *Tides: fundamentals, analysis and prediction*. São Paulo, IPT, 232 p.
- FRIEDRICHS, C. T. (1995). Stability shear stress and equilibrium cross-sectional geometry of sheltered tidal channels. *Journal of Coastal Research*, 11(4):1062-1074.
- GAN, M. A. (1992). Influence of southern oscillation (El Niño) on atmospheric circulation and precipitation over Brazil. In: Lacerda, L. D.; Turcq, B.; Knoppers, B.; Kjerfve, B. (Eds.) *Paleoclimatic Changes and the Carbon Cycle*. Rio de Janeiro, Soc. Brasileira de Geoquímica, p.13-20.
- GAPLAN – GABINETE DE PLANEJAMENTO DE SANTA CATARINA (1986). *Atlas de Santa Catarina*. Rio de Janeiro, Aerofoto Cruzeiro, 173 p.
- HANSEN, D. V. & RATTRAY Jr, M. (1966). New dimensions on estuarine classification. *Limnology and Oceanography*, 11:319-326.
- HOMSI, A. & NOVAES, C. (1987). Estudos das conseqüências das enchentes de junho/83 e agosto/84 no estuário do rio Itajaí-açu e nos projetos. In: Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, 7, Salvador, *Anais*, vol. 3, p.287-299.
- KJERFVE, B. (1986). Circulation and salt flux in a well mixed estuary. In: Van de Kreek, J. (Ed.) *Physics of Shallow Estuaries and Bays*. Berlin, Springer-Verlag, p.22-29.
- KJERFVE, B. (1989). Estuarine geomorphology and physical oceanography. In: Day Jr., J. W.; Hall, C. A. S.; Kemp, W. M.; Yañes-Arancibia, A. (Eds.) *Estuarine Ecology*. New York, John Wiley and Sons, p.47-78.
- KRANCK, K. (1984). The role of flocculation in the filtering of particulate matter in estuaries. In: Kennedy, V. S. ed. *The Estuary as a Filter*. New York, Academic Press, p.159-175.
- KUROSHIMA, K. N. & BELLOTTO, V. (1997). Distribuição de metais traços associados ao material em suspensão no estuário do rio Itajaí-açu, SC – Brasil. In: Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa, 4, Braga, *Anais*, p.563-566.
- MARTIN, L.; FLEXOR, J. M. & SUGUIO, K. (1992). Records of blockage of polar advections and atmospheric circulation over south america, during the last 5,000 years. In: Lacerda, L. D.; Turcq, B.; Knoppers, B.; Kjerfve, B. (Eds.) *Paleoclimatic Changes and the Carbon Cycle*. Rio de Janeiro, Soc. Brasileira de Geoquímica, p.21-24.
- NICHOLS, M. M. & BIGGS, R. B. (1985). Estuaries. In: Davis, R. A. (ed.) *Coastal Sedimentary Environments*. New York, Springer Verlag, p.77-186.
- PONÇANO, W. L. (1982). *Sedimentação atual em área de interesse ao porto de Itajaí, SC*. São Paulo, IPT, Relatório 17.502, 56 p.
- PONÇANO, W. L. (1987). Reconhecimento sedimentológico do estuário do Itajaí-açu, SC. *Revista Brasileira de Geociências*, 17(1):34-41.
- PRITCHARD, D. W. (1955). Estuarine circulation patterns. *Proc. Amer. Soc. Civil Eng.*, 81(717):1-11.
- PRITCHARD, D. W. (1967). Observations of circulation in coastal plain estuaries. In: Lauff, J. H. (ed.) *Estuaries*. Washington, AAAS, p.37-44.
- PUGH, D. T. (1987). *Tides, surges and mean sea level*. New York, John Wiley and Sons, 472 p.
- SCHETTINI, C. A. F. (2000a). River high discharge events and near bottom cohesive sediment transport in the Itajaí-açu estuary, southern Brazil. In: International Conference on Nearshore and Estuarine Cohesive Sediment Transport Processes, 6, Delft, The Netherlands, *Abstracts*, Delft Hydraulics, p.19.
- SCHETTINI, C. A. F. (2000b). Salt wedge dynamics and suspended sediment balance in the Itajaí-açu estuary. In: Physics of Estuaries and Coastal Seas, 10, Norfolk, *Extended abstracts*, Old Dominion University, p.312-315.
- SCHETTINI, C. A. F. (2001). *Dinâmica de sedimentos finos no estuário do rio Itajaí-açu, SC*. Tese de Doutorado, Porto Alegre, UFRGS/CECO, 85 p.
- SCHETTINI, C. A. F.; CARVALHO, J. L. B. e JABOR, P. (1995). Padrões sinópticos das características físicas no estuário do rio Itajaí-açu. Congresso Latino Americano de Ciências del Mar, 6, Mar del Plata, *Resúmenes*, ALICMAR, p.181.
- SCHETTINI, C. A. F.; CARVALHO, J. L. B. & JABOR, P. (1996). Comparative hydrology and suspended matter distribution of four estuaries in Santa Catarina State – Southern Brazil. Workshop on Comparative Studies of Temperate Coast Estuaries, Bahia Blanca, *Proceedings*, IADO, p.29-32.
- SCHETTINI, C. A. F.; CARVALHO, J. L. B. e STEIN, S. S. (1997). Comportamento dos constituintes harmônicos de maré no baixo estuário do rio Itajaí-açu. In: Seminário Sobre Ondas e Marés, 2, Arraial do Cabo, *Resumos*, IAPM, p.IV-78.
- SCHETTINI, C. A. F. & CARVALHO, J. L. B. (1998a). Suspended sediment balance in the estuary of Itajaí-açu river during a low discharge period. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 70:325-334.

- SCHETTINI, C. A. F. & CARVALHO, J. L. B. (1998b). Hidrodinâmica e distribuição de sólidos em suspensão no estuário do rio Itajaí-açu (relatório). *Notas Técnicas da FacimarI*, 2:131-140.
- SCHETTINI, C. A. F.; CARVALHO, J. L. B. e TRUCCOLO, E. C. (1999). Aspectos hidrodinâmicos da enseada da Armação do Itapocoroy, SC. *Notas Técnicas da Facimar*, 3:87-97.
- SCHETTINI, C. A. F.; KJERFVE, B. e CARVALHO, J. L. B. (1997). Dispersão e transporte de sal no estuário do rio Itajaí-açu em condições de baixa descarga. Congresso Latinoamericano sobre Ciências do Mar, 7, Santos, *Anais* (vol. 2) ALICMAR, p.424-425.
- SCHETTINI, C. A. F.; KUROSHIMA, K. N.; PEREIRA F<sup>e</sup>, J.; RÖRIG, L. R. & RESGALLA Jr., (1998) Oceanographic and ecological aspects of the Itajaí-açu river plume during a high discharge period. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 70:325-334.
- SCHETTINI, C. A. F. & STEIN, S. S. (em preparação). *Avaliação da maré astronômica no estuário do rio Itajaí-açu em Blumenau e sua relação com a descarga fluvial*.
- SCHETTINI, C. A. F. & TRUCCOLO, E. C. (1999a). Dinâmica da intrusão salina no estuário do rio Itajaí-açu. In: Congresso Latino Americano de Ciências do Mar, 8, Trujillo, Perú, *Resumenes ampliados*, Tomo II, UNT/ALICMAR, p.639-640.
- SCHETTINI, C. A. F. & 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, Porto Seguro, CD-ROM, ABEQUA.
- SHUBEL, J. R. & CARTER, H. H. (1984). The estuary as a filter for fine-grained suspended sediment. In: Kennedy, V. S. ed. *The Estuary as a Filter*. New York, Academic Press, p.81-105.
- STEIN, S. S. & SCHETTINI, C. A. F. (1997). Comportamento da maré no baixo estuário do rio Itajaí-açu. Semana Nacional de Oceanografia, 10, Itajaí, *Resumos Expandidos*, FACIMAR/UNIVALI, p.509-510.
- TRUCCOLO, E. C. (1998). *Maré meteorológica e forçantes atmosféricas locais em São Francisco do Sul, SC*. Dissertação de Mestrado, UFSC, 100 p.
- TRUCCOLO, E. C.; SCHETTINI, C. A. F.; GERHARDINGER, L. C.; FERREIRA e OLIVEIRA, F. M. (2000). Evidências da circulação induzida pela meteorologia no estuário do rio Itajaí-açu. In: Semana Nacional de Oceanografia, 13, *Anais*, CTTMAR/UNIVALI, p.448-450.
- TRUCCOLO, E. C.; MELO F<sup>a</sup>, E. e SCHETTINI, C. A. F. (1996). Oscilação do nível do mar em resposta à forçantes meteorológicas em São Francisco do Sul, SC – evento de julho de 1996. Simpósio sobre Oceanografia, 3, *Anais*, IO-USP, p.381.
- VARGAS, B. M. (1983). Evolução histórico-morfológica do estuário do rio Itajaí-açu e sua implicação no porto de Itajaí, SC. Rio de Janeiro, INPH, *Relatório* 139/83, 138 p.

## **Physical Characterization of the Itajaí-açu River Estuary, SC**

### **ABSTRACT**

*This paper describes some basic aspects about the hydrodynamics, hydrology and sedimentology of the Itajaí-açu river estuary. It presents results of previous studies developed in the region about external driving agents (fluvial, marine and atmospheric), as well as about internal processes in the estuarine basin. In general, the estuary is of the salt-wedge circulation type, driven mainly by river discharge. Sea-level oscillation either due to astronomical or meteorological forces plays a minor role. Waves and wind appear to have no direct influence as driving agents of hydrodynamic and sedimentological processes in the estuary. The estuary exports most of the suspended sediment delivered by the river, although sediment can be also imported from the continental shelf through the landward bottom currents. Anthropogenic influence related to channel dredging has been changing the hydraulic and sedimentological behavior of the lower estuary systematically since the 50's.*

*Keywords: estuary; hydrodynamics; hydrology; sedimentology; Itajaí-açu river.*