Pesquisas em Geociências

<http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias>

Modos de Transporte de Sedimentos Finos no Estuário do Rio Itajaí, SC

Carlos Augusto França Schettini, Elírio Ernestino Toldo Jr.
Pesquisas em Geociências, 28 (2): 151-160, maio/ago., 2002.

Versão online disponível em:

<http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/article/view/20282>

Publicado por

Instituto de Geociências

Portal de Periódicos **UFRGS**

UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO GRANDE DO SUL

Informações Adicionais

Email: pesquisas@ufrgs.br

Políticas: <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/editorialPolicies#openAccessPolicy>

Submissão: <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/submissions#onlineSubmissions>

Diretrizes: <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/submissions#authorGuidelines>

Data de publicação - maio/ago., 2002.

Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil

Modos de Transporte de Sedimentos Finos no Estuário do Rio Itajaí, SC

CARLOS AUGUSTO FRANÇA SCHETTINI¹ & ELÍRIO ERNESTINO TOLDO JÚNIOR²

¹ Centro de Ciências Tecnológicas da Terra e do Mar – CTTMar/UNIVALI – C.P. 360, Itajaí, SC, 88302-202 – guto@cttmar.univali.br

² Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica – CECO/IG/UFRGS – C.P. 15001, Porto Alegre, RS, 91509-900 – toldo@vortex.ufrgs.br

(Recebido em 10/01. Aceito para publicação em 05/02)

Abstract - This paper presents an assessment about the modes of fine sediment transport in the Itajaí River estuary. The available information to approach a conceptual model is derived from three primary sources: (1) the river sediment delivery; (2) the distribution of salinity and particulate suspended matter (MPS) along the estuary under influence of different river discharge conditions; and (3) near bed hydro-sedimentological processes. The river sediment delivery was achieved by daily monitoring the water and the suspended sediment discharge, since November 1998 at the Indaial lymnometric station, which represents about 70 % of the drainage basin. The salinity and MPS distribution in the estuary were obtained through 47 weekly surveys along the estuary when vertical profiles of these variables were acquired every 1-1,5 km from the mouth to the upper limit of the salt intrusion. The surveys were carried out between November 1998 and November 1999, using an inflatable boat. The results allowed obtain the relationship between the salt wedge extension as function of the river discharge and the estuarine trapping efficiency. The near-bed hydro-sedimentological processes were assessed through the deployment of an instrument tripod on the estuarine bed at the channel thalweg, 4 km upstream from the mouth. The current speed, water level and MPS data were recorded hourly, 1 m above the bottom, from September to November 1999. Based on this data set, two main modes of fine sediment transport in the Itajaí River estuary were identified: a tidal driven and a fluvial driven mode. The tidal driven mode occurs when the river discharge is below 200 m³.s⁻¹. Near bottom sediments are in an erosion-deposition cycle following the semi-diurnal tides and the anomalous cycle of spring and neap tides, with net sediment transport landwards. During such periods fine sediment is imported from the inner shelf. This mode occurs at time scales of weeks to months. The fluvial driven mode is fully developed when the river discharge exceeds 1,000 m³.s⁻¹, accompanied by suspended sediment load as high as 10,000 ton.day⁻¹. Fluvial advective process fully dominates the sediment transport resulting in zero trapping efficiency.

Keywords - Itajaí estuary, fine sediment transport, particulated suspended matter.

INTRODUÇÃO

Apesar da importância da dinâmica de sedimentos finos para a evolução costeira, qualidade ambiental e desenvolvimento econômico, e.g., aporte sedimentar (Milliman & Meade, 1983; UNESCO, 1988), adsorção de poluentes (Förstner & Wittmann, 1983), navegação em portos (Parker, 1989), respectivamente, este ainda é um tópico pouco estudado no Brasil. Mesmo a nível mundial, poucos são os estuários onde este assunto é razoavelmente bem compreendido, e.g., Baía de Chesapeake nos E.U.A. ou estuário do Gironde, França. Isto ocorre devido ao fato de que sedimentos finos são transportados em suspensão, sendo sua dinâmica controlada pelo suprimento, mineralogia, hidrodinâmica e atividade biológica, em escalas temporais de segundos até séculos, e espaciais de centímetros até centenas de quilômetros (Dyer, 1986; Mehta *et al.*, 1989).

Dentro do cenário nacional o estuário do Rio Itajaí apresenta um número razoável de estudos sobre sua hidrodinâmica e dinâmica de sedimentos finos. Tais estudos iniciaram-se nos anos 80 (Vargas, 1983;

Döbereiner, 1985 e 1986; Homsí & Novaes, 1987; Ponçano, 1987), com objetivo de fornecer subsídios para obras de engenharia de interesse da atividade portuária. A partir dos anos 90 houve um novo impulso nos estudos, abrangendo não somente a região de interesse portuário (Schettini & Carvalho, 1998), mas desde o limite superior da intrusão da onda de maré, em Blumenau (Schettini & Stein, em prep.), até a plataforma interna próxima ao estuário onde ocorre o espalhamento da pluma fluvial (Schettini *et al.*, 1998). Contudo, ainda há muitas questões a serem respondidas, sendo uma delas o balanço de sedimentos em escala de tempo sazonal e inter-anual.

Com o objetivo de avaliar a dinâmica de sedimentos finos no estuário afim de contribuir na proposição de um modelo de balanço sedimentar, foram realizadas campanhas de coletas de dados no período de 1998 e 2000 considerando 3 estratégias distintas: o aporte fluvial de sedimentos em suspensão; os processos de transporte e distribuição de sedimentos em suspensão no estuário, principalmente na camada superior dominada por processos advectivos fluviais; e os processos de transporte próximo ao fundo, onde há maior influência dos

efeitos oscilatórios das marés (Schettini, 2001). O objetivo do presente trabalho é reunir os resultados obtidos com estes levantamentos, fornecendo uma caracterização conceptual dos principais modos de transporte de sedimentos finos neste estuário.

ÁREA DE ESTUDO

A desembocadura do estuário do Rio Itajaí situada-se entre as cidades de Itajaí e Navegantes ($26^{\circ} 55' S$ e $48^{\circ} 40' W$), aproximadamente 100 km ao norte de Florianópolis, e recebe o aporte de uma bacia de drenagem de 15.500 km² (Fig. 1). A sua morfologia é bastante simples, similar à um rio meandrante no seu trecho terminal, com largura mais ou menos constante em torno de 200 m. Sua foz encontra-se totalmente retificada com molhes, espigões e enrocamentos, os quais foram construídos com o objetivo de fornecer condições seguras às operações do Porto de Itajaí. Em função deste último também, um intensivo programa de dragagem é realizado para manutenção de um canal de acesso com 11 m de calado.

Dentro do contexto de distinção de processos hidrodinâmicos dominantes em um estuário (E.G., Dionne, 1963), distingue-se a região do baixo estuário com maior influência de água marinha e maior grau de mistura até 8 km à montante da desembocadura, onde deságua o Rio Itajaí-Mirim. Deste ponto até a altura onde deságua o Rio Luiz Alves, aproximadamente 30 km à montante da desembocadura, observa-se na maior parte do tempo uma pronunciada cunha salina e elevado grau de estratificação na coluna de água, caracterizando o médio estuário. Para montante deste ponto observa-se somente os efeitos da propagação da onda de maré, caracterizando um rio mareal ou o alto estuário (Fig. 1). Os trechos de médio e baixo estuário do Rio Itajaí são classificados como altamente estratificados e/ou cunha salina pelo esquema de classificação de Hansen & Rattray (1966), o qual baseia-se em parâmetros adimensionais de circulação e estratificação (Schettini, submetido).

O estuário está sob regime de micro-maré mixta com predominância semi-diurna, com altura média de 0,7 m, variando entre 0,3 e 1,2 m em períodos de quadratura e sizígia, respectivamente. Durante períodos de baixa descarga a oscilação de maré chega até Blumenau, sendo que até a altura de Gaspar praticamente não há perda de energia, caracterizando um sistema síncrono até este ponto (E.G., Nichols & Biggs, 1985). Efeitos meteorológicos sobre o sinal do nível do

mar em frequência supra-mareal são relativamente importantes, e sobre-elevações de mais de 1 m podem ocorrer devido à passagem de frentes frias (Truccolo, 1998).

A descarga fluvial é monitorada diariamente desde 1934 na estação fluviométrica de Indaial, distante 90 km da desembocadura, representando a captação de cerca de 70 % de toda a bacia. A descarga média é $228 \pm 282 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, com pobre padrão sazonal em função da influência de padrões climatológicos locais, e.g., frentes frias e tempestades extratropicais, e remotos, e.g., El Niño. A descarga na maior parte do tempo é baixa, com ocorrência aleatória de picos com mais de $1.000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Contudo, em certos anos também se observa nos meses de verão a elevação da descarga média mensal para valores acima de $500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, caracterizando uma condição tropical (Schettini, 2002).

O sedimento de fundo observado no baixo estuário apresenta dominância da fração argila, seguida de areia e praticamente com ausência da fração silte. Apesar de haver uma variabilidade temporal das frações de cada tipo de material, a fração argila domina amplamente (Schettini, 2002). No médio estuário observa-se a presença de areia de origem fluvial, e no baixo estuário observa-se a presença de areia de origem na plataforma interna (Ponçano, 1987), indicando a importância das correntes de fundo para montante no balanço de sedimentos.

MATERIAL E MÉTODOS

Aporte Fluvial de Sedimentos Finos

A avaliação do aporte fluvial de sedimentos finos transportados em suspensão, ou descarga sólida em suspensão (DSS), vem sendo realizada com frequência diária desde novembro de 1998, na estação fluviométrica de Indaial (Fig. 1). Esta estação é de responsabilidade da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), e mantida e monitorada pelo Departamento Nacional de Prospecção Mineral (DNPM), o qual realiza visitas periódicas para manutenção e aferição da régua limnimétrica. O monitoramento da DSS é feito com a coleta de amostras de água próximo à régua no momento que é realizada a sua leitura pelo monitor. As amostras são armazenadas em ambiente fresco, e semanalmente são trazidas para laboratório onde são analisadas pelo método gravimétrico: filtração em filtros de massa conhecida. Embora a amostra seja pontual, esta estratégia permite uma avaliação temporal mais acurada da relação descarga líquida x DSS.

Distribuição Espacial e Temporal de Material Particulado em Suspensão

No período de novembro de 1998 até novembro de 1999 foram realizados 47 levantamentos aproximadamente semanais da distribuição longitudinal e vertical da salinidade e material particulado em suspensão (MPS) ao longo do baixo e médio estuário (Fig. 1). Estes levantamentos foram realizados com um bote inflável, iniciando à partir de um ponto à 0,4 km à montante da desembocadura, até alguns quilômetros à montante da intrusão salina observada. As estações amostrais foram espaçadas entre 1 e 1,5 km, e em cada uma foram realizados perfis verticais de salinidade e temperatura com uma sonda tipo CTD SensorData™ SD202, e de turbidez com um

turbidímetro de retroespalhamento ótico Seapoint™. Estas informações foram posteriormente tratadas e reduzidas para uma resolução vertical de 0,5 m. O sinal do turbidímetro em Volts foi convertido para concentração de MPS através de uma curva de calibração obtida em laboratório. Os levantamentos foram realizados preferencialmente durante ou próximo à baixamar, e a velocidade do barco inflável permitiu realizar as campanhas em torno de uma hora, garantindo assim quadros sinóticos da estrutura estuarina.

O grau de retenção de MPS oriundo da descarga fluvial no estuário foi avaliado utilizando um coeficiente de retenção conservativo $CR = 1 - MPS_{AE} / MPS_{BE}$ (Schettini, 2001), onde MPS_{AE} é a concentração de MPS no alto estuário, ou a última estação

Figura 1 - Localização da bacia hidrográfica do Rio Itajaí no contexto da América Latina e a linha de costa de Santa Catarina (A), e o estuário do Rio Itajaí (B). BE: baixo estuário; ME: médio estuário; AE: alto estuário.

de cada levantamento onde já não havia mais intrusão salina, e MPS_{BE} é a concentração de MPS no baixo estuário, sendo esta geralmente a estação mais próxima da desembocadura. No cálculo do CR foram utilizados somente os valores de MPS dos dois primeiros metros de coluna de água. Esta escolha arbitrária deve-se à que a camada superficial é dominada pelos processos advectivos fluviais, com pouca influência de processos que se são próximo ao fundo, tais como ressuspensão por correntes de maré ou perturbações mecânicas como dragagens e navegação de navios. Estes processos aumentam a massa de MPS ao longo do estuário, tornando desta forma inviável aplicar um coeficiente de retenção conservativo.

Processos Hidro-sedimentológicos Próximo ao Fundo

Os processos hidro-sedimentológicos próximo ao fundo no estuário foram avaliados através do fundeio de um conjunto de sensores fixos em um tripé instalado no talvegue do canal, à aproximadamente 4 km à montante da desembocadura, durante 75 dias entre setembro e novembro de 1999. No tripé foi fixado um correntógrafo acústico Falmouth™ 3D-ACM, com sensores adicionais de pressão hidrostática, temperatura e um turbidímetro de retro espalhamento ótico SeaPoint™. Havia também um sensor de condutividade/salinidade, contudo este não funcionou satisfatoriamente. O conjunto de sensores ficou nivelado em torno de um metro acima do fundo. As informações foram obtidas a partir de médias de períodos de aquisição de 5 minutos à uma taxa de 5.5 Hz, a cada vinte minutos, sendo posteriormente reduzidos para intervalos de 1 hora. A partir dos dados de velocidade de corrente longitudinal U foi calculado a tensão de cisalhamento (τ) fornecida através da lei quadrática da cisalhamento $\tau = C_D \cdot \rho_w \cdot U^2$, utilizando um coeficiente de arrasto $C_D = 0,0022$ para fundos lamosos (Dyer, 1986), e densidade da água ρ_w constante de 1.025 kg.m⁻³.

RESULTADOS

Aporte Fluvial de Sedimentos Finos

A concentração de MPS (mg.l⁻¹) em Indaial apresentou uma relação direta e linear com a descarga líquida Q (m³.s⁻¹; Fig. 2). Esta relação pode ser empiricamente modelada por $MPS = -11,44 + 0,25$

Q , com coeficiente de explicação $r^2 = 0,66$. Durante o período monitorado, de novembro de 1998 até agosto de 2001, a concentração média de MPS em Indaial foi 55 mg.l⁻¹, e a descarga líquida 260 m³.s⁻¹. A DSS média foi 27 kg.s⁻¹ ou 2300 ton.dia⁻¹. A contribuição total de material neste período foi de $2,1 \times 10^6$ toneladas. Para o período entre novembro de 1998 e novembro de 1999, quando foram realizados os 47 levantamentos longitudinais no estuário, os resultados médios foram um pouco menores: descarga média = 248 m³.s⁻¹; DSS média = 24 kg.s⁻¹, e contribuição total de $0,7 \times 10^6$ toneladas.

Distribuição Espacial e Temporal de Material Particulado em Suspensão

Os 47 levantamentos de distribuição vertical/longitudinal de salinidade e MPS cobriram uma grande variação de descarga fluvial, desde valores inferiores à 100 m³.s⁻¹ até superiores à 1.000 m³.s⁻¹. Contudo, o período entre novembro de 1998 e novembro de 1999 foi caracterizado por baixas descargas durante todo o ano, com pulsos esporádicos distribuídos aleatoriamente. Neste período ocorreu somente 3 eventos hidrológicos em que a descarga excedeu 1.000 m³.s⁻¹, totalizando 8 dias ou 2 % do tempo. Assim sendo, os levantamentos foram realizados na sua maioria sob condições de baixa descarga. Do total dos levantamentos, apenas 13 foram realizados com descarga acima de 300 m³.s⁻¹, que pode ser considerado um valor representativo para descargas médias, e somente 4 com descarga acima de 500 m³.s⁻¹, que já pode ser considerado um valor moderado.

Tanto a intrusão salina quanto a distribuição de MPS no estuário foram fortemente influenciadas pela descarga fluvial: a primeira inversamente e a segunda diretamente. A figura 3 apresenta um exemplo deste comportamento. No dia 27 de Fevereiro de 1999 ocorreu um pico de descarga fluvial de 800 m³.s⁻¹, e neste período em particular foram realizadas uma campanha no dia 26 de Fevereiro, antes do pico, e outras cinco nos dias 2, 4, 5, 10 e 12 de Março, após o pico de descarga (Fig. 3A). No dia 26, com a descarga em torno de 600 m³.s⁻¹ e aumentando, a intrusão salina alcançou 10 km e a distribuição de MPS no estuário seguiu aproximadamente a distribuição de salinidade com maiores valores associados à água fluvial, atingindo mais de 150 mg.l⁻¹. No dia 2 de março a descarga já havia reduzido para 400 m³.s⁻¹, com a cunha apresentando 14 km de extensão. Neste dia a concentração de

Figura 2 - A: Séries temporais diárias de descarga fluvial (linha tracejada, m³.s⁻¹) e material particulado em suspensão (linha contínua, mg.l⁻¹), para o período de novembro de 1998 até agosto de 2000 para o Rio Itajaí na estação fluviométrica de Indaial; B: Curva da descarga de material particulado em suspensão em função da descarga fluvial.

MPS devido à descarga fluvial foi máxima com valores superiores à 250 mg.l⁻¹, e também acompanhando a distribuição da salinidade. Conforme a descarga diminui nos dias subsequentes a água costeira progressivamente penetra na bacia estuarina ao mesmo tempo que ocorre a diminuição da concentração do MPS fornecido pela descarga. Em todas as situações observa-se que a distribuição de MPS segue aproximadamente a distribuição de salinidade. As concentrações eleva-

das de MPS próximo ao fundo observadas nos dias 2, 4 e 5 de Março, foram causadas por perturbação mecânica da dragagem, e no dia 12 devido a manobras de atracação de navios no porto (Fig. 3D), ambos ocorrendo nos primeiros 5 km do estuário (Fig. 3B).

A extensão média da intrusão da cunha salina nos 47 levantamentos foi $17,5 \pm 7$ km, com mínima de zero e máxima de 32 km. Considerando todos os levantamentos, a relação da extensão da intrusão da

Figura 3 - Distribuição vertical/longitudinal de salinidade (‰, C) e material particulado em suspensão (mg.l⁻¹, D) no estuário do Rio Itajaí (B) em diferentes dias durante um período de pulso de descarga fluvial (A), em Fevereiro e Março de 1999. Em D, Dg indica perturbação mecânica causada por dragagem, e Nv indica perturbação mecânica causada por navios.

cunha salina EC (km) em função da descarga fluvial Q (m³.s⁻¹) apresenta-se não linear e inversamente relacionada (Fig. 4), podendo ser empiricamente modelada através de $EC = -1,72 + 32,69 e^{(-0,00217Q)}$, com coeficiente

de explicação $r^2 = 0,70$ (Schettini & Truccolo, 1999). Nos períodos prolongados de baixa descarga a extensão da cunha salina excede 30 km, ao passo que quando a descarga fluvial ultrapassa 1.000 m³.s⁻¹, toda a

Figura 4 - Relação da intrusão da cunha salina no estuário em função da descarga fluvial em Indaial.

Figura 5 - Relação do coeficiente de retenção de sedimentos finos em função da descarga fluvial em Indaial. Os círculos pretos são as amostras arbitrariamente selecionadas para a obtenção de uma regressão entre ambos os parâmetros.

água salgada no interior da bacia estuarina é expulsa e a água fluvial é diretamente liberada na plataforma. Resultados similares foram apresentados por Dobereiner (1985).

O coeficiente de retenção (CR) médio foi $0,53 \pm 0,25$, variando de zero até 0.93. A relação do CR em função da descarga fluvial apresentou um padrão complexo, onde arbitrariamente pode-se definir dois modos de variação (Fig. 5). Aparentemente há um modo independente da descarga fluvial, onde em condições de baixa descarga ($< 400 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) o CR pode variar entre 0,1 e 0,9, e outro dependente, linear e inversamente relacionado com a descarga. Assim sendo, os valores obtidos foram selecionados empiricamente para distinguir as duas relações, estando àqueles associados com a descarga fluvial em círculos pretos na Fig. 5. Com os 27 pontos selecionados, a relação do CR em função da descarga pode ser modelada por $CR = 0,84 - 7,6 \cdot 10^{-4} Q$, com coeficiente de explicação $r^2 = 0,71$.

Processos Hidro-sedimentológicos Próximo ao Fundo

As séries obtidas com o fundeio do correntógrafo no talvegue no canal e a descarga fluvial para o período de 18 de Setembro até 16 de Outubro de 1999 são mostradas na Fig. 6. A linha em negrito nas séries de nível, velocidade e MPS representa variações em frequências supra-mareais. Este período em particular é representativo das duas condições distintas às

quais o estuário pode estar sujeito. No primeiro meio mês lunar, abrangendo um ciclo completo quadratura-sizígia, a descarga fluvial permanece baixa durante todo o tempo com valores em torno de $150\text{-}200 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$; o nível de água no estuário é controlado pela maré astronômica, havendo também oscilações do nível da ordem de 20 cm devido à efeitos meteorológicos na zona costeira. O sinal de velocidade oscila entre máximos de aproximadamente $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ para vazante e enchente com velocidade de corrente residual da ordem de $0,10 \text{ m.s}^{-1}$ sempre para montante. O MPS é diretamente determinado pelas correntes de marés, alcançando valores máximos em torno de 500 mg.l^{-1} durante picos de velocidade de corrente na sizígia.

Durante o segundo ciclo ocorreram dois picos de descarga fluvial que excederam $1.000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, alterando consideravelmente os padrões observados no ciclo anterior. Seguindo os picos de descarga fluvial observa-se uma resposta não mareal do nível estuarino em torno de 0,5 m. O sinal de correntes é totalmente assimétrico para jusante, alcançando 1 m.s^{-1} independente da fase do ciclo lunar. O MPS segue coerentemente os picos fluviais, alcançando valores máximos similares aos observados durante a sizígia do ciclo anterior, contudo perduram por períodos de tempo maiores. Durante o primeiro período onde somente havia os efeitos da maré, a tensão de cisalhamento fornecida pelo escoamento atingiu valores máximos de 0,9 e 0,7 Pa para correntes máximas de enchente e vazante, respectivamente. Durante o segundo período

Figura 6 – Séries temporais de descarga fluvial (A) na estação fluviométrica de Indaial, e nível da água (B), velocidade de corrente longitudinal (C) e concentração de material particulado em suspensão (D) no talvegue do canal, a um metro acima do fundo e 4 km à montante da desembocadura do estuário do Rio Itajaí.

a tensão máxima atingiu 0,5 e 2,3 Pa para correntes máximas de enchente e vazante, respectivamente.

DISCUSSÃO

O estuário do Rio Itajaí é classificado como sendo do tipo cunha salina ou altamente estratificado. Em termos conceptuais, isto implica que os processos advectivos fluviais predominam sobre os efeitos das marés ou da geomorfologia (Dyer, 1990). Contudo, considerando as escalas temporais dos diversos agentes determinantes, observa-se que a descarga fluvial apresenta-se extremamente variável, podendo ocorrer períodos de baixa descarga durante 60 dias consecutivos ou mais, períodos de descarga moderada para elevada da mesma forma, ou períodos de baixa descarga intercalados com pulsos de alta descarga fluvial distribuídos aleatoriamente. Durante períodos prolongados de baixa descarga os efeitos de maré tornam-se relativamente

mais importantes, atribuindo um aspecto determinístico na dinâmica sedimentar em função da previsibilidade das marés astronômicas.

Estudos anteriores já indicaram que durante períodos prolongados de baixa descarga o balanço residual de sedimentos finos é positivo, o que significa importação de sedimentos a partir da plataforma continental para o interior do estuário (Ponçano, 1987, Schettini & Carvalho, 1998). Este resultado somado ao fato da necessidade contínua de dragagens para manutenção do calado no baixo estuário na região de interesse do Porto de Itajaí, e com os resultados que indicam que a taxa de retenção de MPS é elevada em condição de baixa descarga, sugerem que o estuário atua como um filtro eficiente para sedimentos provenientes da drenagem continental, bem como importador de sedimentos da plataforma interna. Isto acarretaria em uma escala de tempo moderada, e.g, 10^2 a 10^3 anos, o acelerado preenchimento da bacia. Contudo, isto não ocorre, o que aponta

para a existência de um mecanismo atuante na remobilização dos sedimentos retidos e importados, de forma a revitalizar em intervalos de tempo os padrões fisiográficos da bacia atualmente observados.

A partir dos resultados obtidos é possível distinguir dois modos distintos de transporte de sedimentos finos no estuário do Rio Itajaí, os quais cada qual atuando com um peso específico permitem supor que a morfologia atual do estuário encontra-se próximo do equilíbrio entre o aporte de sedimento e os agentes hidrodinâmicos, marés e descarga fluvial, e variando na mesma escala de tempo que estes. Durante períodos de baixa descarga que perduram por algumas semanas é possível identificar as principais características do modo de transporte dominado pela maré. Nesta condição a descarga fluvial encontra-se geralmente abaixo de $200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, e como a DSS é diretamente relacionada à esta, também é reduzida da ordem de $2 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$; a maior parte deste material fica retido no estuário dado que este apresenta maior eficiência de retenção nestes períodos. Os efeitos das correntes de marés próximo ao fundo atuam na erosão e deposição periódica do sedimentos de fundo, o que associado com a circulação estuarina resulta em um transporte residual para montante da ordem de $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Esta taxa de transporte é máxima durante os períodos de sizígia, e praticamente nula durante os períodos de quadratura. Este processo confirma as observações da importação de sedimento da plataforma continental. Ainda não é possível inferir à respeito do tempo necessário após um evento hidrológico extremo para que este quadro se desenvolva efetivamente, porém pelas observações do comportamento da descarga fluvial, a sua escala de tempo é da ordem de semanas até meses.

A situação antagônica à descrita acima seria o modo de transporte dominado pela descarga fluvial. A dominância da descarga fluvial é plena quando esta excede $1.000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, acarretando a expulsão da água costeira da camada de fundo que normalmente se estende por vários quilômetros à montante em condições de baixa descarga. A descarga sólida em suspensão aumenta significativamente durante estes picos, atingindo valores da ordem de $200 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$. Nesta situação o transporte advectivo está plenamente atuante e a retenção de sedimentos na bacia estuarina é praticamente nula, havendo inclusive erosão acentuada em zonas críticas levando ao aumento do volume da bacia. A dominância da descarga fluvial é suficiente para sobrepular totalmente as correntes de maré mesmo durante os períodos de sizígia, e o transporte de sedi-

mento próximo ao fundo torna-se unidirecional para jusante, podendo alcançar valores da ordem de $100 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. A duração dos picos de descarga fluvial está na escala de tempo de horas até dias, contudo em períodos de precipitação elevada na bacia como já foi observado em determinados eventos de El Niño, esta escala pode ser de semanas.

Apesar do aporte e transporte de sedimentos durante o domínio do modo fluvial serem mais intensos, com duas a três ordens de magnitude superior ao período governado pela maré, a frequência dos eventos do modo fluvial não excederam a 8 dias entre Novembro de 1998 e Novembro de 1999. Estes condicionantes sugerem que o material de preenchimento da bacia estuarina provém da importação de sedimentos da plataforma interna como observado na distribuição espacial e temporal da cunha salina e MPS (Fig. 3). Estes materiais provavelmente foram exportados a partir do próprio estuário durante períodos de alta descarga fluvial. Por outro lado, a distribuição de MPS no estuário é diretamente associado com o aporte fluvial, o que a priori sugere erroneamente como sendo o principal mecanismo de sedimentação no estuário.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar de já ser possível identificar as principais características dos dois modos de transporte de sedimentos finos atuantes no estuário do Rio Itajaí, ainda não é possível identificar claramente o papel de cada um durante períodos de transição quando a descarga encontra-se entre 300 e $800 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Nestes períodos há a dominância de processos advectivos fluviais na camada superior, porém ainda há a intrusão salina e consequentemente os efeitos de transporte residual para montante na camada próximo do fundo. Este processo, o qual predomina durante os períodos de baixa descarga, talvez seja o responsável pela maior parte do sedimento que assoreia a região portuária e o estuário de maneira geral. Ainda não há subsídios suficientes para afirmar, mas sugere-se como hipótese que o aporte fluvial é efetivamente o principal fornecedor de MPS para a coluna de água no estuário, contudo, o material que constitui o leito é proveniente na sua maior parte da plataforma interna. Este material, exportado através do estuário, está sujeito à dinâmica costeira, e a compreensão do processo como um todo depende também de se acoplar este compartimento à dinâmica de sedimentos finos no estuário do Rio Itajaí.

AGRADECIMENTOS

Os dados utilizados neste trabalho são provenientes de diferentes projetos. O monitoramento da descarga sólida em suspensão e distribuição vertical/longitudinal de salinidade e MPS no estuário foram financiados pela Administradora Hidroviária Docas Catarinense (ADHOC); o fundeio do correntógrafo no leito do estuário foi financiado pela HAM Dredging. Contribuíram significativamente nas campanhas de aquisição de dados Eliane C. Truccolo e Valdenir Manoel Inês.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Dionne, J.C. 1963. Towards a more adequate definition of the St. Lawrence estuary. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 7(1):36-44.
- Döbereiner, C.E. 1985. **Comportamento hidráulico e sedimentológico do estuário do Rio Itajaí** – SC. Rio de Janeiro. 34p. Relatório 700/03, Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias.
- Döbereiner, C.E. 1986. Sedimentação no estuário do Rio Itajaí. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE HIDRÁULICA, 12., 1986, São Paulo, SP. *Anais...* Porto Alegre, ABRH, p. 1-10.
- Dyer, K.R. 1986. *Coastal and estuarine sediment dynamics*. New York, John Wiley and Sons, 342p.
- Dyer, K.R. 1990. *Estuaries: a physical introduction*. 2nd Ed., New York, John Wiley & Sons, 195p.
- Förstner, U. & Wittmann, G.T.W. 1983. *Metal pollution in the aquatic environment*. Berlin, Springer-Verlag, 486p.
- Hansen, D.V. & Rattray, M. 1966. New dimensions on estuarine classification. *Limnology and Oceanography*, 11:319-326.
- Homs, A. & Novaes, C. 1987. Estudos das consequências das enchentes de junho/83 e agosto/84 no estuário do Rio Itajaí e nos projetos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE HIDROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS, 7., 1987, Salvador, BA, *Anais...* Porto Alegre, ABRH, v. 3, p. 287-299.
- Mehta, A.J.; Hayter, E.J.; Parker, W.R.; Krone, R.B. & Teeter, A.M. 1989. Cohesive sediment transport. 1: processes description. *ASCE Journal of Hydraulics Engineering*, 115:1076-1093.
- Milliman, J.D. & Meade, R.H. 1983. World-wide delivery of river sediment to the oceans. *The Journal of Geology*, 91(1):1-21.
- Nichols, M.M. & Biggs, R.B. 1985. Estuaries. In: Davis Jr., R.A. (ed.) *Coastal sedimentary environments*. New York, Springer Verlag, p.77-186.
- Parker, W.R. 1989. Definition and determination of the bed in high concentration fine sediment regimes. *Journal of Coastal Research*, SI-5:175-184.
- Ponçano, W.L. 1987. Reconhecimento sedimentológico do estuário do Itajaí-açu (SC). *Revista Brasileira de Geociências*, 17(1):34-41.
- Schettini, C.A.F. 2001. **Dinâmica de sedimentos finos no estuário do Rio Itajaí, SC**. Porto Alegre, 92p. Tese de Doutorado em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Schettini, C.A.F. 2002. Caracterização física do estuário do Rio Itajaí. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. (no prelo).
- Schettini, C.A.F. & Carvalho, J.L.B. 1998. 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.; Kuroshima, K.N.; Pereira Fo., J.; Röhrig, L.R. & Resgalla Jr., C. 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. & Truccolo, E.C. 1999. Dinâmica da intrusão salina no estuário do Rio Itajaí-açu. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CIÊNCIAS DO MAR, 8., 1999, Trujillo, Perú, *Resúmenes ampliados...* Tomo II, UNT/ALICMAR, p. 639-640.
- Schettini, C.A.F. & Stein, S.S. (em preparação) *Avaliação da maré astronômica no estuário do Rio Itajaí em Blumenau e sua relação com a descarga fluvial*.
- Truccolo, E.C. 1998. **Maré meteorológica e forçantes atmosféricas locais em São Francisco do Sul, SC**. Florianópolis, 100p. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina.
- UNESCO 1988. **River inputs to ocean systems: status and recommendations for research**. Paris, UNESCO Technical Papers in Marine Science, n. 50, 25p.
- Vargas, B.M. 1983. **Evolução histórico-morfológica do estuário do Rio Itajaí e sua implicação no Porto de Itajaí** – SC. Rio de Janeiro. 138p., Relatório 139/83, Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias.