Pesquisas em Geociências

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

Transporte de sedimentos em suspensão em um estuário altamente estratificado sob condições de descarga fluvial transiente

Guilherme Algemiro Manique, Carla de Abreu D'Aquino, Carlos Augusto França Schettini

Pesquisas em Geociências, 38 (3): 225-234, set./dez., 2011.

Versão online disponível em:

<http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/article/view/35159>

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 - set./dez., 2011.

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

Transporte de sedimentos em suspensão em um estuário altamente estratificado sob condições de descarga fluvial transiente

Guilherme Algermiro MANIQUE¹, Carla de Abreu D'AQUINO¹ & Carlos Augusto França SCHETTINI^{2(*)}

¹ Programa de Pós-Graduação em Geociências – PPGGEO, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Av. Bento Gonçalves, 9500. Bl 1. Prédio 43113, Campus do Vale. Agronomia. Cep. 91509-900. Porto Alegre, RS. email: guilhermemanique@hotmail.com , cadaquino@gmail.com

² Departamento de Oceanografia – DOcean, Universidade Federal de Pernambuco - UFPE. Av. Prof. Moraes Rego, 1235. Cep. 50670-901. Recife, PE. email: guto.schettini@gmail.com

(*) Autor para correspondência

Recebido em 06/2010. Aceito para publicação em 08/2011.

Versão online publicada em 05/11/2012 (www.pesquisasemgeociencias.ufrgs.br)

Resumo - O presente trabalho investiga o regime hidrodinâmico e o transporte de sedimentos em suspensão no estuário do rio Araranguá sob condições de descarga fluvial transiente após um pico de vazão. Uma campanha de campo foi realizada em maio de 2006 durante a qual foram registrados dados de nível da água, velocidade e direção de correntes, salinidade e concentração de sedimentos em suspensão (CSS). Dados de correntes foram obtidos com o fundeio de um perfilador de correntes por efeito Doppler, a partir do qual foi também estimada a CSS através do retro-espalhamento acústico. A campanha foi realizada durante a fase de recessão do hidrograma de cheia, com a descarga fluvial diminuindo de 120 para 30 m³s⁻¹ em um período de 50 horas. Durante este período ocorreu uma significativa mudança da distribuição longitudinal da salinidade, bem como das correntes e da CSS. As correntes responderam ao pico de descarga passando de um regime barotrópico com sentido a jusante para um regime baroclínico em duas camadas, com correntes com sentido a jusante na camada superficial, e sentido a montante na camada de fundo. O transporte de sedimentos em suspensão foi diretamente relacionado com as correntes, passando de um regime de exportação durante o pico de descarga para um regime de importação na camada de fundo.

Palavras-chave: Rio Araranguá; hidrodinâmica; circulação gravitacional; PACD.

Abstract - SUSPENDED SEDIMENT TRANSPORT IN A HIGHLY STRATIFIED ESTUARY UNDER TRANSIENT RIVER DISCHARGE. The present paper assesses the hydrodynamics and suspended sediment transport in the Araranguá river estuary in response to a flood peak. A field survey was carried out in May, 2006, when water level, current velocity and direction, salinity and suspended sediment concentration (SSC) were recorded. Current data were obtained through a moored acoustic Doppler current profiler, from which the SSC were estimated based on the acoustic backscattering. The field survey was carried out just after a flood peak, during the waning phase of the hydrogram, when the discharge decreased from 120 to 30 m³s⁻¹ in a 50-hour period. The longitudinal salinity distribution was strongly affected as well as the currents and SSC. The currents responded to the flood peak by changing from a barotropic regime downstream to a two layer baroclinic, with downstream currents at surface layer and upstream currents at the bottom layer. The suspended sediment transport was directly related to the currents, changing from an exportation phase during the flood peak to an importation phase through the bottom layer.

Keywords: Araranguá River; hydrodynamics; gravitational circulation; ADCP.

1. Introdução

Estuários são ambientes transicionais na interface continente-oceano os quais concentram o fluxo de massa para os mares costeiros. São ambientes onde são observados fortes gradientes ambientais resultantes da dinâmica de interação entre a água doce e marinha no interior da bacia estuarina (Cameron & Pritchard, 1963; Dyer, 1997; Miranda *et al.*, 2002; Prandle, 2009). A mistura entre as águas de diferentes densidades depende do nível

de energia disponível para gerar mistura. Esta é fornecida principalmente pela fricção gerada pela propagação da onda de maré, a qual produz macro-turbulência. Além de afetar a distribuição vertical e longitudinal da salinidade, isto também traz implicações nos processos de transporte e retenção de materiais em um estuário. Muitos estuários possuem um elevado grau de retenção de materiais (sedimentos, nutrientes e poluentes), o que é definido como efeito filtrante (Schubel & Carter, 1984). O efeito filtrante é definido pelo balanço entre o apor

aporte através da entrada fluvial e trocas através da desembocadura com a plataforma adjacente, o que está intrinsecamente relacionado com a circulação (Dyer, 1995).

A concentração de sedimentos em suspensão (CSS) varia significativamente de um estuário para outro, bem como no tempo e no espaço para um mesmo estuário (Dyer, 1995; Uncles *et al.*, 2002), e ocorre normalmente em estado floculado (Dyer, 1986; Eisma, 1993). Isto torna os estudos sobre o transporte de sedimentos em suspensão uma tarefa complexa, pois requer a obtenção de dados em quantidade e qualidade para abranger os fenômenos de interesse nas escalas de tempo e espaço apropriadas, *e.g.*, usualmente da ordem de horas e de metros para a escala vertical. O transporte de sedimentos em suspensão se dá de maneira bastante heterogênea no tempo, variando rapidamente em resposta a eventos hidrológicos de curta duração (Schettini, 2000; Wall *et al.*, 2008). Isto é particularmente observado em estuários dominados por rios que ocorrem ao longo da costa de Santa Catarina (*e.g.* Schettini, 2002). Estes sistemas apresentam em comum bacias de drenagem relativamente pequenas (< 10.000 km²) e sujeitas a um clima subtropical úmido, com chuvas distribuídas ao longo de todo o ano (GAPLAN, 1986) e tempo de concentração de cheias da ordem de horas. Nestes sistemas, a descarga é baixa durante a maior parte do tempo, ocorrendo pulsos de descarga fluvial de curta duração acompanhados do aumento da descarga sólida em suspensão (Schettini & Toldo, 2006). Os sistemas mais relevantes são (por ordem decrescente de tamanho de bacia de drenagem) os rios Itajaí-Açu, Tubarão, Araranguá, Itapocu, Tijucas e Mampituba.

Este trabalho apresenta uma avaliação da hidrodinâmica e transporte de sedimentos em suspensão no estuário do rio Araranguá sob condições transientes de descarga fluvial. A campanha de campo a partir da qual o trabalho foi escrito foi inicialmente planejada como uma campanha de reconhecimento. Contudo, a mesma se deu fortuitamente logo após um evento hidrológico de alta descarga, permitindo assim uma rara oportunidade de se observarem os processos estuarinos durante tais condições. Uma contribuição focando mais a parte hidrodinâmica foi apresentada por D'Aquino *et al.* (2010), enquanto o presente estudo foca no transporte de sedimentos em suspensão.

2. Área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Araranguá está localizada no extremo sul de Santa Catarina, entre as latitudes de 28° 40' S e 29° 10' S e as longitudes de 049° 20' W e 050° 00' W, apresentando uma área de 3020 km² e com um somatório total de cursos de água de 5.916 km (SEDRAF, 1997).

A bacia do rio Araranguá é uma das áreas mais críticas do estado em termos ambientais, onde mais da metade de seus rios encontram-se consideravelmente poluídos. Isto é devido às atividades de cultivo de arroz irrigado e à mineração e processamento de carvão, as quais influenciam diretamente na disponibilidade e qualidade das águas. De acordo com Alexandre & Krebs (1995), a drenagem ácida causada pela mineração é hoje a principal responsável pela acidez das águas desta bacia, e mesmo na região estuarina, onde é esperado um efeito tamponante da água marinha, o pH é da ordem de 5 (D'Aquino *et al.*, 2010).

De acordo com o Atlas Climatológico do Estado de Santa Catarina, a bacia do rio Araranguá está inserida em uma região de clima mesotérmico, com temperaturas médias abaixo de 18 °C nos meses mais frios, e em torno de 28 °C nos meses mais quentes (Krebs, 2004). A topografia é caracterizada por uma expressiva variação na altitude, sendo inferior a 100 m na ampla planície costeira e chegando a 1400 m nos pontos mais elevados na escarpa da Serra Geral, o que favorece a ocorrência de chuvas orográficas.

O Rio Araranguá (Fig. 1) é formado pela confluência dos rios Itoupavas e Mãe Luzia, apresentando orientação geral leste-oeste e sinuosidades do tipo meandrante. Próximo da costa, em Morro dos Conventos, a orientação muda para nordeste e o traçado torna-se paralelo à linha de costa por cerca de 7 km antes de desaguar no mar. A profundidade média do estuário é da ordem de 7,5 m, sendo menor próximo da desembocadura, onde é da ordem de 2,5 m, e para montante, onde chega a 12 m nas cercanias da cidade de Araranguá, 30 km montante da desembocadura (D'Aquino *et al.*, 2010).

O regime de maré regional é de micromarés de acordo com a classificação de Davies (1964), com variações de nível da água que dificilmente ultrapassam 1 m. As maiores variações de nível estão relacionadas com eventos de marés meteorológicas provocadas pela entrada de frentes frias. O padrão de distribuição de salinidade no estuário é do tipo altamente estratificado ou cunha salina, respondendo rapidamente a mudanças da descarga fluvial (D'Aquino *et al.*, 2010).

Figura 1 Localização da área de estudos, indicando no painel B a delimitação da bacia hidrográfica do rio Araranguá e locais de mineração e processamento de carvão, e no painel C o detalhe do estuário e o local de instalação dos equipamentos.

3. Material e métodos

A campanha de coleta de dados ocorreu entre os dias 11 e 13 de maio de 2006. No dia 11 foi realizado o fundeio (Fig. 1) em frente ao Iate Clube Morro dos Conventos ($28^{\circ}55'41''$ S e $049^{\circ}21'33''$ W) com um perfilador acústico de correntes por efeito Doppler (PACD, marca Nortek A/S modelo Aquadopp Profiler de 1000 kHz) junto ao fundo e uma sonda tipo CTD (conductivity/temperature/depth, marca Saiv A/S modelo STD 204) com um sensor de turbidez (marca SeaPoint) por retroespalhamento ótico nivelada cerca de 1 m acima do fundo. O PACD e o CTD foram configurados para fazer registros em intervalos de 10 minutos, sendo que o PACD registrou dados a partir de médias de períodos de 2 minutos a 2 Hz, com uma resolução vertical de 0,3 m (tamanho de células verticais).

Complementarmente foram realizados dois levantamentos espaciais ao longo do estuário para obtenção da distribuição de salinidade. Os levantamentos foram iniciados na desembocadura, com deslocamento no sentido estuário acima, com estações em intervalos de 1 km até cerca de 31 km. Um levantamento foi realizado no dia 11, e o segundo foi realizado no dia 13.

Dados de vazão dos rios Mãe Luzia e Itoupavas e dados de precipitação para estações localizadas na bacia foram obtidos com o Centro de

Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina (CIRAM).

A gravimetria é o método direto para determinação da CSS, o qual consiste na mensuração do conteúdo total da massa de material particulado em uma amostra de água. Embora seja o método mais preciso e direto, requer a coleta de amostras de água e o seu posterior processamento: pesagem de filtros secos, filtragem, secagem e nova pesagem de filtros. Isto traz algumas limitações quando se requer observações prolongadas e com alta frequência amostral (Gartner, 2004). Atualmente são amplamente utilizados métodos indiretos através de radiação eletromagnética ou ondas acústicas, porém o método gravimétrico ainda desempenha papel fundamental na calibração destes outros (e.g. Schettini *et al.*, 2010).

Equipamentos óticos, como transmissômetros, medem a atenuação da intensidade luminosa causada pelas partículas em suspensão em um determinado percurso, e os nefelômetros medem a reflexão ou retroespalhamento ótico (REO) como princípio de determinação das concentrações. Uma vez calibrados, estes sensores permitem uma excelente resolução espacial e temporal, uma vez que podem ser utilizados como monitores autônomos. Entretanto, atenção deve ser dada quanto ao seu emprego em diferentes locais devido à mudança das características

espectrais dos sedimentos ou, ainda, à incrustação (e.g. Kinneke & Sternberg, 1992). A obtenção de CSS através de métodos acústicos não é uma técnica recente, embora seja comparativamente menos utilizada que métodos gravimétricos ou óticos. Seu princípio é semelhante ao dos turbidímetros do tipo nefelômetro, porém utilizando emissão e reflexão de ondas acústicas: retroespalhamento acústico (REA). Os perfiladores acústicos de correntes por efeito Doppler (PACDs), equipamentos utilizados para esta técnica, foram criados primeiramente para o monitoramento de parâmetros de correntes como velocidade e direção. Os PACDs utilizam o Efeito Doppler, que verifica a alteração da frequência sonora entre uma fonte e um receptor relacionado à aproximação ou afastamento entre os mesmos. Neste caso, como o som não é refletido pela água em si, mas por partículas em suspensão, o movimento percebido é o das partículas. Estas partículas podem ser sedimentos, organismos planctônicos ou, ainda, bolhas de ar (Sontek, 1997) e possuem relação direta com a concentração de MPS (Lohrmann, 2001). A amplitude de reflexão das partículas, que é também armazenada no equipamento com a finalidade de seleção dos dados, quando normalizada, fornece o Retroespalhamento Acústico (REA), o qual pode ser utilizado em calibrações para o MPS. Uma vez calibrados, os PACD podem fornecer informações com excelente resolução temporal e espacial na coluna de água (Zaleski & Schettini, 2006; Schettini & Zaleski, 2006; Schettini *et al.*, 2010).

A metodologia para utilização do retroespalhamento acústico registrado em PACDs para obtenção de SSC é descrita em Zaleski & Schettini (2006), e resume-se à solução da equação do sonar

$$REA = 0,43 (A_r - r) + 20 \log_{10} (R) + 2\alpha_w (R) + \alpha_p \quad (1)$$

O PACD registra o eco acústico em termos de amplitude, A_r , do qual deve ser subtraído o ruído basal do instrumento, r . O sinal de amplitude é dado em *counts* (unidade logarítmica interna do equipamento) e é convertido em potência sonora (dB) pelo produto com o fator de escala 0,43. A obtenção de valores de REA depende ainda da normalização dos dados de amplitude corrigidos para torná-los independentes da distância do transdutor e do efeito cônico da abertura do feixe acústico, onde R é a distância ao longo do feixe acústico, e pode ser obtido através de uma relação trigonométrica com o ângulo de inclinação dos feixes em relação à distância na vertical, α_w é a absorção pela água em dB.m^{-1} , e α_p é a atenuação pelas partículas, também em dB.m^{-1} . O segundo termo da esquerda para a direita representa a correção geométrica da forma cônica do feixe acústico, o terceiro termo serve para atenuar a os efeitos da absorção da energia acústica na água e o último corrige a absorção pelas próprias partículas em suspensão, porém é geralmente ignorado (Lohrmann, 2001; Gartner, 2004).

A partir da obtenção dos valores de REA, estes foram cruzados com os valores de REO para fornecer o modelo de conversão de REO(REA) representado na figura 2.

Figura 2. Relação do retroespalhamento ótico (REO, NTU) em função do retroespalhamento acústico (REA, dB) obtida com dados no estuário do rio Araranguá.

No presente estudo não foi realizada a calibração do REO para sua conversão em CSS, sendo utilizado para isto o modelo apresentado por Zaleski & Schettini (2006) para o estuário do rio Itajaí-açu. A adoção de um modelo de conversão de REO para CSS gerado para outro estuário pode gerar erro. Entretanto, a faixa de CSS no presente estudo é de suspensão lamosa de baixa concentração (*e.g.* Winterwerp & van Kesteren, 2004), chegando até poucas centenas de mg.l^{-1} . Neste caso, a relação entre REO e CSS é linear (*e.g.* Kineke & Sternberg, 1992), ou seja, mesmo que exista uma diferença de características radiométricas entre os sedimentos dos dois estuários, os resultados apresentarão coerência linear e serão aceitos para a mesma ordem de

magnitude de CSS.

4. Resultados e discussão

Embora não tenha sido previamente planejada, a campanha foi realizada logo após um evento de pluviosidade significativa acompanhado de um pico de descarga fluvial (Fig. 3), o que permitiu avaliar os processos de transporte em condições transientes de descarga fluvial. A precipitação acumulada nos dias anteriores foi próxima de 80 mm, o que representa o total esperado para o mês de maio em termos de média climatológica (GAPLAN, 1986). O pico de vazão chegou a $123 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ no dia 11 de maio, reduzindo para $45 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ no dia 12, e $25 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ no dia 13.

Figura 3. (A) Precipitação mês de maio de 2006 para duas estações pluviométricas (sub-bacias dos rios Itoupavas e Mãe Luzia) na bacia hidrográfica do rio Araranguá, e (B) vazão somada dos rios Itoupavas e Mãe Luzia.

A resposta da estrutura estuarina ao pico de descarga ocorreu com defasagem temporal. A distribuição de salinidade no dia 11 (Fig. 4A), no pico da descarga fluvial, apresentou a intrusão salina chegando até cerca de 20 km a montante da desembocadura. No dia 13, quando a descarga estava no patamar de $25 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ a intrusão salina

máxima foi de 10 km. Apesar do pico de descarga fluvial, a capacidade volumétrica do estuário foi maior do que a contribuição líquida durante o evento hidrológico. A integral da descarga para o pico de cheia apresentado na figura 3 é da ordem de $17 \times 10^6 \text{ m}^3$, enquanto a capacidade volumétrica do estuário é da ordem de

$28 \times 10^6 \text{ m}^3$, considerando a extensão de 35 km, largura média de 100 m e profundidade média de 8 m.

Ainda que o aporte de volume não tenha sido suficiente para ocasionar a expulsão da salinidade do estuário, é observado um aumento significativo da estratificação. No dia 11 as isohalinas apresentaram padrão verticalizado, passando para padrão horizontal no dia 13. Os maiores valores de salinidade foram da ordem de 16 no dia 11, e no dia 13 a salinidade passou de 30 na região mais próxima da desembocadura. A condição inicial pode ser explicada pela baixa

descarga e dominância do regime de marés que antecedeu o evento pluviométrico. O aporte fluvial induz a estratificação da coluna de água, enquanto que o efeito da maré induz a mistura vertical. Na propagação da maré estuário adentro, a fricção com o fundo e bordas produz macroturbulência, o que gera a mistura e resulta na verticalização das isohalinas (Dyer, 1997; Prandle, 2009). O aumento da descarga, por outro lado, produz a advecção de águas menos densas sobre as águas salinas mais densas, ocorrendo um fluxo de empuxo deslocando a primeira sobre a segunda (Miranda *et al.*, 2002).

Figura 4. Distribuição longitudinal de salinidade (psu) no estuário nos dias 11 (superior) e 13 (inferior) de maio de 2006. O eixo das abscissas representa a distância da desembocadura em km e o eixo das coordenadas representa a profundidade em m. O polígono em preto representa o leito do estuário.

O efeito de mudança da vazão ao longo do período monitorado produziu uma perceptível diminuição no nível da água e alteração nos padrões das correntes (Fig. 5A e 5B). O nível da água apresentou diminuição de quase 1 m durante as 6 primeiras horas do monitoramento, das 16:00 até as 22:00 do dia 11. Após este período, o nível passou a oscilar respondendo à variação da maré semi-diurna, apresentando uma assimetria com períodos de enchente curtos e de vazante longos. Durante as primeiras seis horas de monitoramento, quando ocorreu a diminuição mais expressiva do nível da água, as correntes foram mais intensas acima de $0,4 \text{ ms}^{-1}$ com sentido estuário afora. As correntes com sentido para jusante predominaram

praticamente durante todas as primeiras 24 horas, embora com diminuição da intensidade para $0,2 \text{ ms}^{-1}$ durante o primeiro período de enchente em torno das 22 horas do dia 11. Neste período foram registradas correntes próximas ao fundo, com sentido estuário acima, de baixa magnitude. No período de vazante seguinte as correntes foram unidirecionais com sentido de jusante em toda a coluna de água, embora com magnitudes inferiores às observadas no período inicial.

Na enchente em torno das 12 horas do dia 12 foi registrada a mudança do sentido das correntes em toda a coluna de água durante a enchente, com a velocidade máxima da ordem de $0,2 \text{ ms}^{-1}$. No período de vazante seguinte, nas

primeiras horas as correntes foram para jusante em toda a coluna de água, porém após cerca de duas horas o sentido da corrente na camada de fundo até 3 m.a.f. (metros acima do fundo) inverte para sentido estuário acima com magnitude de $0,3 \text{ m.s}^{-1}$. A magnitude da corrente de fundo diminui gradualmente, e durante o período de enchente as correntes passam a ser para montante em toda a coluna de água, com maior intensidade na camada superficial. Este padrão se repetiu no ciclo de maré

seguinte. Até cerca das 14 horas do dia 12 o regime de correntes respondeu unicamente a força barotrópica produzida pelo pico de descarga fluvial, com correntes unidirecionais em toda a coluna de água, tanto para enchente quanto que para vazante. A partir das 14 horas do dia 12, a forçante fluvial perde a sua preponderância, passando esta para um gradiente de pressão baroclínico que induz a um claro padrão de circulação gravitacional.

Figura 5. (A) Variação temporal do nível da água, e distribuição vertical/temporal de (B) correntes (m.s^{-1}), (C) concentração de sedimentos em suspensão (mg.l^{-1}) e (D) transporte instantâneo ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$). m.a.f. – metros acima do fundo. Valores positivos de correntes indicam correntes de enchente e os valores negativos representam vazante.

A distribuição de CSS acompanhou diretamente o regime de correntes (Fig. 4C). Durante o período inicial a CSS foi da ordem de 30 mg.l^{-1} em toda a coluna de água, diminuindo para cerca de 15 mg.l^{-1} durante o primeiro período de enchente, e

voltando a subir para 30 mg.l^{-1} na vazante seguinte, e diminuindo para 15 mg.l^{-1} na enchente seguinte. Após estes ciclos, a CSS ficou estratificada, assim como as correntes, com um pico de concentração junto ao fundo que chegou à ordem de 200 mg.l^{-1} .

Este pico de concentração durou apenas algumas horas, diminuindo em seguida para níveis de 30 mg.l^{-1} , com este padrão sendo repetido no ciclo de maré seguinte. Neste período a camada superficial apresentou as menores concentrações da ordem de 10 mg.l^{-1} . O fluxo de sedimentos em suspensão instantâneo por metro de seção transversal (Fig. 4D), obtido pelo produto entre a velocidade e a CSS, mostra que houve predomínio do fluxo para fora durante quase todo o período monitorado, embora de baixa magnitude, $-0,01 \text{ kg.m}^{-1}\text{s}^{-1}$. O fluxo inverteu para montante, ficando próximo de zero, a não ser durante o curto período em que ocorreu a inversão de correntes acompanhado do pico de CSS, quando o fluxo para montante chegou a $0,08 \text{ kg.m}^{-1}\text{s}^{-1}$.

A figura 6A apresenta a variação temporal do fluxo instantâneo para os níveis de fundo, meia água e superfície. As variações do fluxo nos diferentes níveis oscilaram em fase até às 14 horas do dia 12, ainda que no primeiro período de enchente tenha ocorrido um período de inversão de sentido. Após as 14 horas do dia 12 os fluxos passam a se comportar com inversão de fase, principalmente comparando os níveis de superfície e fundo. Enquanto o fluxo de superfície aumenta com sentido para montante, o de fundo aumenta com sentido de jusante. O reflexo em termos de transporte é apresentado em termos da variação acumulativa do fluxo instantâneo para os três níveis (Fig. 6B).

Figura 6. (A) Transporte instantâneo de sedimentos em suspensão nos níveis de fundo, meia água e superfície, e (B) transporte acumulativo de sedimentos em suspensão nos níveis de fundo, meia água e superfície durante o período de observação.

Até às 14 horas do dia 12 o transporte acumulado foi para jusante em toda a coluna de água. Após o evento de mudança de padrão de correntes, ocorre a inversão do sentido do transporte, passando a acumular com sentido para montante próximo ao fundo, embora continue a ser para jusante na camada superficial.

A fase inicial do transporte de sedimentos em suspensão, tal qual as correntes, foi dominada pelo processo advectivo fluvial, com regime barotrópico. Com a diminuição do papel da descarga como forçante principal do escoamento, o efeito da circulação gravitacional passou a ser mais notável (regime baroclínico), resultando em exportação na camada superficial e importação na camada de fundo. Embora o monitoramento tenha encerrado antes que um equilíbrio fosse alcançado, podemos formular um cenário dos processos subsequentes. Considerando que os padrões atuantes no estuário do rio Araranguá sejam similares aos observados no estuário do rio Itajaí-Açu, o período de exportação dominado pelo regime fluvial é maior em função do aumento da descarga fluvial com o aumento da CSS durante o pico de cheia (Schettini, 2002). Nos períodos de baixa descarga, a descarga sólida em suspensão diminui significativamente e, como consequência, o transporte tende a zero. No estuário, isto será refletido pelo transporte nulo na camada superficial. Por outro lado, em baixa descarga fluvial os processos de transporte associados com a circulação gravitacional passam a ser mais importantes (Schettini *et al.*, 2006), com transporte na camada de fundo com sentido para montante.

5. Conclusões

O regime hidrodinâmico e o transporte de sedimentos em suspensão foram avaliados no estuário do rio Araranguá sob condições transientes de descarga fluvial. Os principais resultados indicam que com a diminuição da descarga fluvial, a hidrodinâmica e o transporte de sedimentos em suspensão passam de um regime barotrópico para um regime baroclínico, e isto ocorre de maneira abrupta. Sob condição forçada pelo regime fluvial, o transporte é predominante para fora do estuário. Sob regime forçado pela circulação gravitacional, o transporte passa a ser para fora na camada superficial e para o interior na camada de fundo. O estuário passa de exportador para importador de sedimentos em suspensão.

Agradecimentos: Os autores agradecem à Defesa Civil, ao Corpo de Bombeiros e ao Iate Clube de Araranguá

pelo apoio logístico para realização das atividades de campo. Ao Ten. Kemper, Sg. Djalma S. Niles e Sds. Sebastião A. de Souza e Geovanne Texeira. Aos colegas Mariana Couceiro e Marçal Duarte, no auxílio das atividades de campo. Este estudo foi realizado dentro do projeto *Processos de Transporte e Retenção de Sedimentos em Estuários Dominados por Rios - TRANSEST* (CNPq 480851/2004-2). Guilherme A. Manique recebeu bolsa de iniciação científica ProBic/ProPPEC/UNIVALI. Carla de A. D'Aquino recebe bolsa de doutorado do CNPq, proc. 306217/2007-4. CNPq-PQ 306772/2010-8.

Referências

- Alexandre, N.Z. & Krebs, A.S.J. 1995. *Qualidade das Águas Superficiais do Município de Criciúma, SC*. Porto Alegre: CPRM, 1995. Série Recursos Hídricos, v.6. (Programa de Informações Básicas para Gestão Territorial de Santa Catarina – PROGESC).
- Cameron, W. M. & Pritchard, D. W. 1963. Estuaries. In: Hill, M. N. (ed). *The Sea. Ideas and Observations on Progress in the Study of the Seas*. New York, Interscience, pp.306-324.
- D'Aquino, C.A.; Pereira Filho, J. & Schettini, C.A.F. 2010. Fluvial modulation and salt transport in a highly stratified estuary. *Brazilian Journal of Oceanography*, 52(2):165-175.
- Davies, J. L. 1964. Morphogenic approach to world shorelines. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 8: 127-142.
- Dyer, K.R. 1986. *Coastal and estuarine sediment dynamics*. New York, John Wiley and Sons, 342p.
- Dyer, K.R. 1995. Sediment transport processes in estuaries. In Perillo, G.M.E. (ed.). *Geomorphology and sedimentology of estuaries*. Developments in Sedimentology, 53. Elsevier Science, pp. 423-449.
- Dyer, K.D. 1997. *Estuaries - A physical introduction*. Chichester, J Wiley & Sons, 195 p.
- Eisma, D. 1993. *Suspended Matter in the aquatic environment*. New York, Springer-Verlag, 315p.
- GAPLAN – Gabinete de Planejamento De Santa Catarina. 1986. *Atlas de Santa Catarina*. Rio de Janeiro, Aerofoto Cruzeiro, 173 p.
- Gartner, J.W. 2004. Estimating suspended solid concentrations from backscatter intensity measured by Doppler current profiler in San Francisco Bay, California. *Marine Geology*, 211:169-187.
- Kineke, G.C. & Sternberg, R.W. 1992. Measurements of high concentrated suspended sediments using the optical backscatterance sensor. *Marine Geology*, 108(3-4):253-258.
- Krebs, A.S.J. 2004. *Contribuição ao conhecimento dos recursos hídricos subterrâneos da bacia hidrográfica do rio Araranguá, SC*. Florianópolis, Tese de doutorado, Dpto. de Geociências, Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, 376p.
- Lohrmann, A. 2001. *Monitoring sediment concentration with acoustic backscattering instruments*. Nortek AS, Rud, Norway, Nortek Tech Note n° 03, 5p.

- Miranda, L.B.; Castro, B.M. & Kjerfve, B. 2002. *Princípios de Oceanografia Física de Estuários*. São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo – EDUSP. 424p.
- Prandle, D. 2009. *Estuaries: dynamics, mixing, sedimentation and morphology*. Cambridge, Cambridge University Press, 236p.
- SEDRAE. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Rural e da Agricultura. 1997. *Zoneamento da disponibilidade e da qualidade hídrica da bacia do rio Araranguá*. Documento síntese. Florianópolis. v.1.
- Schettini, C.A.F. 2000. Near bed sediment transport in the Itajaí-Açu River estuary, southern Brazil. In: Winterwerp, J.C. & Kranenburg, C. (Eds). *Fine sediment dynamics in the marine environment*. New York, Elsevier, p499-512.
- Schettini, C.A.F. 2002 Caracterização física do estuário do rio Itajaí-Açu, SC. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 7:123-142.
- Schettini, C.A.F. & Toldo Jr, E.E. 2001 Modos de transporte de sedimentos finos no estuário do rio Itajaí, SC. *Pesquisas em Geociências*, 28(2):151-160.
- Schettini, C.A.F.; Toldo Jr, E.E. 2006 Fine sediment transport modes in the Itajaí-Açu estuary, Southern Brazil. *Journal of Coastal Research* SI39:515-519.
- Schettini, C.A.F. & Zaleski, A.R. 2006. A utilização de perfiladores acústicos de corrente por efeito Doppler na determinação do material particulado em suspensão na água: aplicações. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 11 (3):201-208.
- Schettini, C.A.F.; Almeida, D.C.; Siegle, E.; Alencar, A.C.B. 2010. A snapshot of suspended sediment and fluid mud occurrence in a mixed-energy embayment, Tijucas Bay, Brazil. *Geo-Marine Letters*, 30:47-62.
- Schubel, 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
- SONTEK 1997. *Acoustic Doppler Profiler (ADP) principles of operation*. San Diego, Sontek Technical Notes, 12 p.
- Uncles, R.J.; Stephens, J.A. & Smith, R.E. 2002. The dependence of estuarine turbidity on tidal intrusion length, tidal range and residence time. *Continental Shelf Research*, 22:1835-1856.
- Wall, G.R.; Nystrom, E.A. & Litten, S. 2008. Suspended sediment transport in the freshwater reach of the Hudson river estuary in eastern New York. *Estuaries and Coasts*, 31:542-553.
- Winterwerp, J.C. & van Kesteren, W.G.M. 2004. *Introduction to the physics of cohesive sediment in the marine environment*. New York, Elsevier, 466 p.
- Zaleski, A.R. & Schettini, C.A.F. 2006. Procedimentos para calibração de perfiladores acústicos de corrente por efeito Doppler para a determinação da concentração do material particulado em suspensão na água. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 11(3):191-200.