

PADRÕES DE CIRCULAÇÃO E MISTURA ESTUARINA DO RIO JACUIPE - LITORAL NORTE DO ESTADO DA BAHIA: SUA INFLUÊNCIA NA FORMAÇÃO DA ZONA DE TURBIDEZ MÁXIMA

Geraldo Marcelo Pereira Lima¹; Guilherme Camargo Lessa².

¹Mestrando do Curso de Pós-Graduação em Geologia Costeira e Sedimentar, Universidade Federal da Bahia, Centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia, Laboratório de Estudos Costeiros. e-mail: gm@cpgg.ufba.br

²Prof. Dr. do Curso de Pós-Graduação em Geologia Costeira e Sedimentar, Universidade Federal da Bahia, Centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia, Laboratório de Estudos Costeiros. e-mail: glessa@cpgg.ufba.br

RESUMO

O presente estudo foi realizado com o objetivo de compreender as características hidrodinâmicas no estuário do Rio Jacuípe e sua influência na formação da zona de turbidez máxima. As campanhas de salinidade e turbidez ocorreram em setembro de 2001, sendo os dados projetados em perfil longitudinal, contemplando-se os diferentes períodos (sizígia e quadratura) e estágios (enchente e vazante) da maré, em distintas condições de descarga fluvial.

ABSTRACT

This work presents a study of hydrodynamics features at Jacuípe River Estuary and its influence on the formation of a estuarine turbidity maximum. The measurements of salinity and turbidity were taken in September 2001. The results were plotted on longitudinal profiles taking in account spring/neap and flood/ebb periods, on different fresh-water discharge condition.

Palavras-Chave: zona de turbidez máxima, hidrodinâmica estuarina, Rio Jacuípe

1. INTRODUÇÃO

Estuários são feições costeiras bastante dinâmicas no tempo e no espaço, com origem associada à elevação do nível relativo do mar e inundação dos vales na zona costeira. Do ponto de vista oceanográfico, estas feições sofrem influência das descargas de água doce dos rios, onde a água salgada é diluída. Geologicamente, estuários são ambientes de vida efêmera, atuando como depósitos efetivos dos sedimentos fluviais e marinhos, dependendo diretamente das condições hidrodinâmicas reinantes.

Os mecanismos físicos que controlam a hidrodinâmica estuarina (circulação e mistura) são principalmente governados pela ação das marés e pela descarga de água doce. Em função destas variáveis, diferentes processos de circulação e mistura podem ocorrer tanto no sentido vertical como longitudinal (Dyer, 1995). As oscilações da maré, além dos estágios de enchente e vazante (diário) ocorrem entre os ciclos de sizígia e quadratura (semanal) e sua variação entre solstícios e equinócios (semestral) (Fettweis, *et al.*, 1998). A descarga de água doce compreende a descarga fluvial (principalmente), subterrânea e precipitação direta, cuja variabilidade ocorre sazonalmente, entre as estações secas e chuvosas (Wolanski, *et al* 1996).

A identificação dos padrões de circulação e mistura nos ambientes estuarinos é importante para o controle, distribuição e do transporte de materiais (matéria orgânica particulada, sais, sedimentos, nutrientes, poluentes) e na localização das áreas com maior concentração e deposição dos sedimentos finos, denominada Zona de Turbidez Máxima - ZTM (Schoellhamer, 2001; 1996). Nesta área, um grande volume de sedimento em suspensão pode ficar retido dentro do corpo estuarino e passar por várias etapas antes da deposição final.

A ZTM pode ser encontrada em estuários de variados tamanhos, formas, profundidades e alturas de marés

(macro, meso e micromaré). Os principais mecanismos que influenciam na sua formação são: (i) circulação residual no fundo e a assimetria da velocidade de corrente de maré, resultado da circulação gravitacional e bombeamento da maré, respectivamente, (ii) floculação do material particulado em suspensão, (iii) e padrões de mistura estuarina, do tipo cunha salina, parcialmente estratificado e bem misturado (Geyer, *et al.*, 2002; Burchard & Baumert, 1998; Dyer, 1995)

Nas últimas décadas, com o crescimento das atividades econômicas, intensificaram-se os lançamentos de substâncias tóxicas (resíduos industriais e domésticos) nos estuários. Estas substâncias podem ser encontradas diluídas na água, agregadas no substrato superficial ou transportadas sob a forma de pluma em suspensão e possivelmente a sua maior concentração ocorrem concomitante a ZTM (Schoellhamer, 1996).

A partir da década de 70, grandes descargas de poluentes foram lançadas no Rio Jacuípe, com a implantação do Complexo Petroquímico de Camaçari e mais recentemente, com o crescimento de significativos vetores de urbanização. Na zona estuarina foram encontrados valores elevados de chumbo, cobre, zinco, arsênio e cromo, sendo que as áreas preferenciais de deposição destes metais são ainda desconhecidas.

O objetivo principal deste estudo é identificar a formação da zona de turbidez máxima no estuário do Rio Jacuípe, em função os padrões de circulação e mistura estuarina, sob diferentes volumes do prisma de maré (em sizígia e quadratura) e condições de descarga fluvial.

2. ÁREA DE ESTUDO

O Rio Jacuípe localiza-se no Litoral Norte do Estado da Bahia. Compreende os municípios de São Sebastião do Passé, Mata de São João e Dias Dávila. O curso principal percorre uma extensão de 120 km, entre a nascente e foz.

O baixo curso do rio, onde são encontradas as condições estuarinas, pertence ao município de Camaçari, apresentando características geomorfológicas de planície costeira, com canal estuarino meandrante. Às margens deste canal, observa-se pequenas planícies de maré com a presença de vegetação de mangue, com topografia bastante suave.

As marés na zona estuarina atingem 1,88 e 1,00 m em sizígia e quadratura, respectivamente.

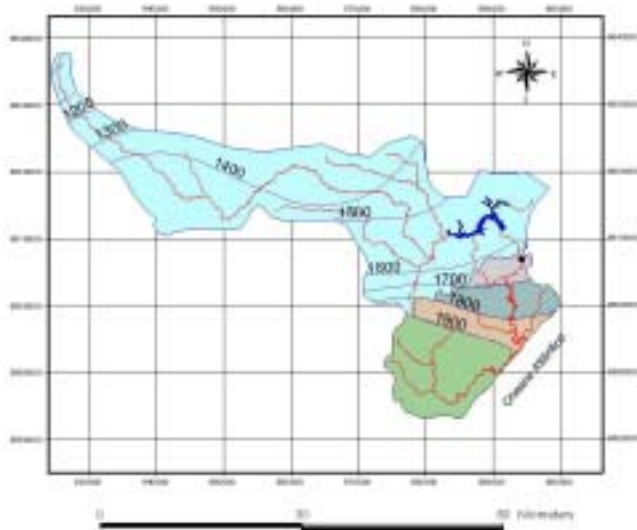


Figura 1 – Bacia hidrográfica do Rio Jacuípe, com a localização da Barragem de Santa Helena, a estação fluviométrica de Emboacica (•) e a distribuição das isoietas anuais.

O clima na bacia de drenagem é classificado como do tipo tropical chuvoso, com duas estações definidas (seca e chuvosa). O período de abril a agosto se caracteriza como de maior precipitação, enquanto que o período seco ocorre nos meses de setembro a março (com destaque para janeiro e fevereiro). A pluviosidade média acumulada é de 1900 mm/ano no litoral e diminui para 1000 mm/ano na cabeceira da bacia (Figura 1).

A bacia de drenagem é relativamente pequena com uma área de aproximadamente 1275 km², sendo 880 km² associados a drenagem da Barragem de Santa Helena (localizada a 35 Km da foz). Atualmente, sua importância econômica tem sido crescente, pelo suporte ao abastecimento de água para a Região Metropolitana de Salvador.

Os dados de vazão da barragem, a partir do ano de 2000 (ano em que voltou a operacionalizar, devido ao seu rompimento em 1985) não estão ainda disponíveis. A entrada de água doce (runoff) para o estuário foi obtida pela estação fluviométrica de Emboacica, localizada 8 km a jusante da barragem (estação mais jusante no rio, com dados estendidos entre 1955 e 1999) e pela estimativa de descarga da área de drenagem não contemplada pela estação.

A vazão média para o sistema estuarino é de 20,15 m³ s⁻¹. As descargas médias associadas aos períodos secos e chuvosos são de 7,5 e 38,5 m³ s⁻¹, respectivamente. A maior vazão diária medida, considerando-se apenas a estação de Emboacica, foi de 108 m³ s⁻¹.

3. METODOLOGIA

Os padrões de circulação e mistura no estuário do Rio Jacuípe, bem como a ZTM foram monitorados por diversas campanhas de coleta de dados, desde o ano de 2000. Foram selecionadas para este trabalho apenas as condições extremas, ou seja, nos picos dos períodos (sizígia/quadratura) e estágios (preamar/baixamar) da maré, nas condições de ausência e em elevada descarga fluvial para o estuário. O período de monitoramento apresentado neste trabalho ocorreu em setembro de 2001, que apesar de coincidir com a estação seca, apresentou uma grande quantidade de chuva.

3.1 Perfis longitudinais

As campanhas de coleta de dados foram realizadas diariamente entre 07 e 21 de setembro de 2001. Foram feitas perfilagens verticais a cada metro na coluna d'água, em pontos distribuídos ao longo do curso estuarino, separados em aproximadamente 500 m. Os dados de salinidade e turbidez foram medidos por meio de uma sonda multiparâmetros (Hydrolab – Multiparameter Water Quality Monitoring Instruments). Estas medições ocorreram na estufa da preamar e baixamar, até o ponto mais interno do rio, onde a presença de sal deixou de ser verificada e valores estabilizados de turbidez fossem observados. Os dados foram projetados em perfil longitudinal com o auxílio do software Surfer, utilizando-se o método de Kriging como interpolador.

3.2 Descarga Fluvial

Apesar dos dados de vazão da Barragem de Santa Helena (determinado pela abertura das comportas) não estarem ainda disponíveis, estimou-se empiricamente a descarga, com base no método de Schreiber (Miranda, *et al.*, 2002), onde foram utilizados os dados pluviométricos do próprio barramento, considerando-se que a precipitação e evapotranspiração foram uniformes durante a realização do trabalho, para as áreas de drenagem a montante (880 Km²) e jusante (200 Km²) da barragem, não considerando a área do Rio Capivara Grande (195 Km²), sendo a equação expressa por:

$$\Delta f/P = \exp (E_v/P),$$

em que $\Delta f/P$ = fração adimensional da taxa de escoamento superficial e parcela da taxa de precipitação, E_v e P (mm) indicam taxas mensais da evapotranspiração potencial e de precipitação, respectivamente.

$$Q_f = \Delta f/P * PA_T = \Delta fA_T$$

onde, Q_f = vazão total (m³ s⁻¹) das áreas montante e jusante de Santa Helena, PA_T = produto da taxa de precipitação pela área.

4. RESULTADOS

Os perfis longitudinais de salinidade apresentaram as três principais situações de circulação e mistura características de um estuário: cunha salina, parcialmente estratificado e bem misturado. No período de ausência da

descarga fluvial (ver Figura 2), as duas primeiras condições ocorreram no ciclo de quadratura, entre os dias 07 e 15. Na preamar, a coluna d'água é parcialmente estratificada, enquanto que na baixamar esta estratificação aumenta. Neste período, a estratificação ocorre devido às velocidades de correntes serem insuficientes para eliminar completamente o sal, nos pontos de maior profundidade "salt plug" (Figuras 3a e 3b).

A penetração do sal em quadratura atinge o valor máximo de 30 ups, observado até 4 Km da desembocadura, enquanto a presença de sal é inexistente aos 7 Km. Neste período, em ambos os perfis, a maior turbidez ocorreu no fundo do canal, em uma pequena porção nas proximidades da ausência de salinidade, atingindo valores de 36 e 32 NTU na baixamar e preamar, respectivamente.

No período de sizígia, a característica apresentada é de estuário bem misturado, onde ocorre a homogeneização de toda a coluna d'água, observando-se apenas o gradiente longitudinal de salinidade. Na baixamar, os valores máximos de salinidade são inferiores se comparados com os valores em quadratura, com o máximo de 20 ups (2 Km da desembocadura) e seu limite a 7 Km. Novamente neste trecho, a turbidez é elevada, dobrando de valor para cerca de 75 NTU (Figura 3c).

Contudo, na preamar com a maior penetração da salinidade oceânica, amplia-se a extensão da zona de mistura estuarina para 16 Km (Figura 3d). Vale a pena ressaltar que, este limite de penetração do sal coincidiu com a faixa de transição entre a vegetação halófila com a limnimeética. Desta vez, a zona de maior turbidez migrou para montante dos pontos anteriores até atingir o máximo de 55 NTU. Observa-se também em segundo plano, a concentração da turbidez aos 7 Km do canal, conforme apresentados anteriormente nas outras situações (Figura 3d).

As condições de elevada descarga fluvial ocorreram no período de sizígia, entre os dias 19 e 21 de setembro estimada em $90,0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Figura 2), considerada acima da média das máximas. A precipitação acumulada no dia foi de 216 mm e, se comparada a precipitação média acumulada do mês mais chuvoso (235 mm) é bastante elevada.

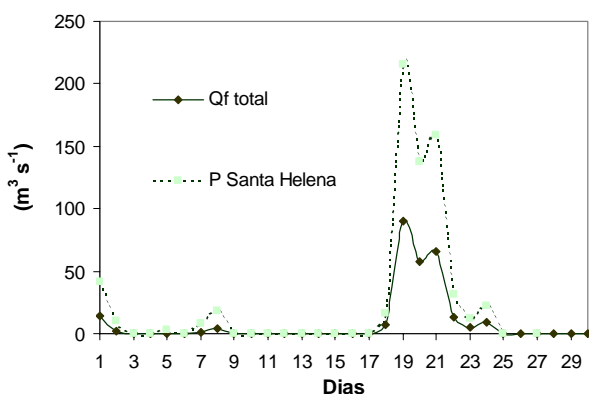


Figura 2 – Descarga de água doce estimada para a zona estuarina, Qf = vazão total e P = chuva do período (setembro de 2001)

Neste período, todas as comportas da represa mantiveram-se abertas, de forma que esta descarga atingiu a zona costeira (ver Figura 3e).

Na baixamar, a salinidade foi completamente expulsa do estuário. Neste momento, devido a intensidade da descarga fluvial, a turbidez é ampliada, sendo estes os maiores valores observados, todos superiores a 100 NTU, em toda a coluna d'água (Figura 3e). Já na preamar deste mesmo período, a penetração ocorreu por cunha salina e se restringiu aos 6 Km. A ZTM novamente localizou-se a 7 Km no interior do estuário, no contato entre os ambientes salobro e doce, atingindo-se 63 NTU (Figura 3f).

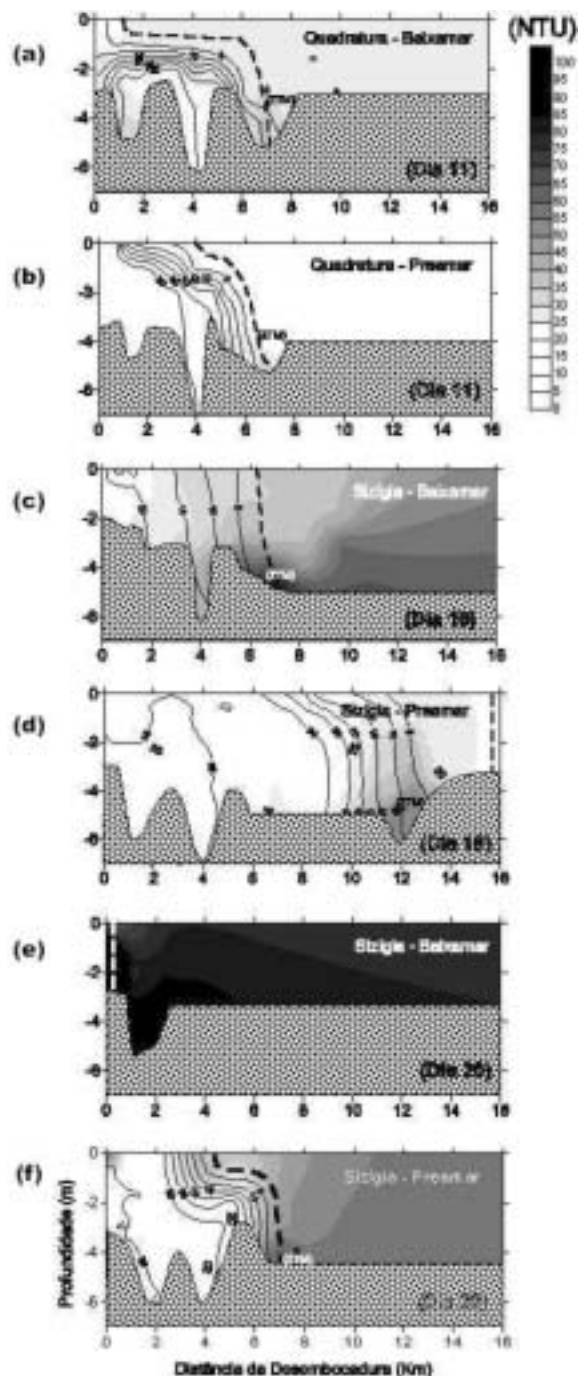


Figura 3 – Perfis longitudinais do Estuário do Rio Jacuípe, com as linhas de salinidade (ups) e turbidez (NTU). A linha pontilhada refere-se ao limite de penetração da salinidade.

5. DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

Geralmente, um dos padrões de circulação e mistura predomina num determinado sistema estuarino. Entretanto, dois ou mais tipos podem ser observados periodicamente pela diferença entre os estágios e períodos enchente/vazante e sizígia/quadratura (Schoelhamer, 2001; Wolanski, *et al.*, 1996), conforme as condições observadas neste trabalho. Porém, se no decorrer de uma longa série temporal, prevalecer um sentido de intensidade entre as correntes (circulação residual), a tendência de transporte dos sedimentos será na direção do fluxo residual (Dyer, 1995; 1986).

Quando as forçantes fluvial e de maré são comparáveis, as características apresentadas são de parcialmente misturado ou parcialmente estratificado, devido ao gradiente de pressão que ocorre pela diferença de densidade entre a água marinha e fluvial. A água doce que chega no sistema, em função de sua menor densidade, tende a se manter na superfície, movendo-se em direção ao oceano. Ao contrário, a água de origem marinha possui maior densidade penetra no interior do estuário pelo fundo (circulação gravitacional). Nestas condições de circulação, a formação da ZTM está associada ao nível de não movimento entre as camadas (zona nula), cuja área é marcada por pequenas velocidades residuais onde os sedimentos são aprisionados (Schoelhamer, 1996; Dyer, 1995).

O estuário do Rio Jacuípe tornou-se verticalmente homogêneo ou bem misturado, quando dominado pela ação da maré de sizígia (Figuras 3c e 3d). Neste período, as velocidades de corrente sendo maiores, estas promoveram maior homogeneização na coluna d'água, sendo capazes de ressuspender as partículas finas inconsolidadas no fundo do canal. Desta forma, a alta concentração de sedimento em suspensão (ZTM) pode ser associada a este tipo de situação, decorrente da maior intensidade nas velocidades das correntes, onde o contato direto da água marinha (mais densa), com o fundo do canal estuarino, ocasiona o transporte por advecção. Faz-se oportuno mencionar que a ZTM pode se mover livremente ao longo deste ciclo de maré. Contudo, ao aproximar do período de quadratura, ocorre redução da velocidade de corrente e, a grande concentração de sedimento em suspensão pode dar origem a uma deposição lamosa. Neste caso, a alta concentração de sedimento em suspensão pode se tornar parte permanente no fundo, até o próximo ciclo de sizígia (Dyer, 1995).

Quando o ambiente foi dominado pela ação fluvial e coincidindo com a maré vazante, a zona de mistura foi comprimida na porção inferior do estuário, onde a presença de sal foi inexistente (Figura 3e). A alta turbidez foi resultado da descarga sólida fluvial. Com a penetração da maré de enchente o ambiente tornou-se altamente estratificado ou de cunha salina. Nestas condições iniciais, a ZTM pode ser advectada dezenas de quilômetros em direção da plataforma, a depender do aporte fluvial e pouca sedimentação ocorre dentro do corpo estuarino (Geyer, 2002). Todavia, na ausência destas condições de descarga, em decorrência da estação seca nas bacias de drenagem, as condições

hidrodinâmicas reinantes passam ser as da zona costeira, onde a zona de intrusão salina será prolongada poderá existir o transporte de sedimentos da plataforma para aos estuários (Wolanski, *et al* 1996).

A presença da ZTM ocorre preferencialmente na interface entre a água doce e salobra, em ambiente oligohalino (salinidade entre 0,5 e 5 ups), localizando-se aos 7 Km do canal estuarino, exceto quando ocorreu elevada descarga fluvial.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BURCHARD & BAUMERT, 1998. The Formation of Estuarine Turbidity Maxima Due to Density Effects in the Salt Wedge. A Hydrodynamic Process Study. American Meteorological Society. (25) 309-321.
- 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, p. 423-449.
- DYER, K.R., 1986. Coastal and Estuarine Sediment Transport. A Wiley – Interscience Publication. Institute of Oceanographic Sciences. Bidston, UK. 342p.
- FETTWEIS, M; SAS, M. & MONBALIU, J., 1998. Seasonal, Neap-spring and Tidal Variation of Cohesive Sediment Concentration in the Scheldt Estuary, Belgium Estuarine, Coastal and Shelf Science. (47) 21–36.
- GEYER, W.R.; HILL, P.S. & KINEKE, G.C., 2002. The transport and dispersal of sediment by buoyant coastal flows. Continental Shelf Research (submitted).
- MIRANDA, L. B.; CASTRO, B. M.; KJERFVE, BJORN., 2002. Princípios de Oceanografia Física de Estuários. Ed. da Universidade de São Paulo.
- SCHOELHAMER, D.H., 2001, Influence of salinity, bottom topography, and tides on locations of estuarine turbidity maxima in northern San Francisco Bay. Elsevier Science B.V., p. 343-357.
- SCHOELHAMER, D. H., 1996. Factors affecting suspended-solids concentrations in South San Francisco Bay – California. Journal of Geophysical Research. Vol. 101, nº C5, p. x112087–12095.
- THILL, A.; MOUSTIER, S.; GARNIER, J. M.; ESTOURNEL, C.; NAUDIN, J. J.; BOTTERO, J. Y., 2001. Evolution of particle size and concentration in the Rhône river mixing zone: influence of salt flocculation. Continental Shelf Research. (21) 2127 –2140.
- WOLANSKI, E.; HUAN, N. N.; DAO, L. T.; NHAN, N. H. & THUY, N. N., 1996. Fine-sediment Dynamics in the Mekong River Estuary, Vietnam. Estuarine, Coastal and Shelf Science. (43) 565–582.