DINÂMICA DA DESEMBOCADURA DO CORPO LAGUNAR DO ARARAPIRA

PAOLA MIHÁLY¹ & RODOLFO JOSÉ ANGULO²

ABSTRACT *DYNAMIC OF THE ARARAPIRA LAGOONAL MOUTH* The Ararapira lagoonal mouth connects the ocean to Ararapira lagoon (Ararapira Sea), and has a SSW-NNE orientation, parallel to the coastline. The mouth has had a southwestward continuous lateral migration. The dominant direction of longshore currents is NE, related to the passage of cold fronts. Lasting absence of this meteorological effect causes temporary changes on wave features, leading to inversion of longshore currents. Considering this inversion, two circulation models of tidal currents and sediments are suggested acting alternately to induce migration to SW, opposite to longshore currents. Under the influence of NE longshore currents the acting processes on the erosive margin during ebb tide are similar to those on the concave margins of meandering rivers; sand is deposited on the longshore drift delta. However when longshore currents are inverted, the sands of the longshore drift delta are eroded through wave action and deposited, during flood tides, on the growing margin. This sand is here deposited because of drift blocking by ebb tide currents. The Ararapira lagoonal margins show critical erosion portions, mainly on the internal margins of the sandy barrier that separates coastal lagoon from ocean; this erosional process can lead to a new lagoonal mouth. This, together with progressive elongation of the coastal lagoon caused by lateral sandy barrier growth would lead to the opening of a new mouth to the NE of the present one, and to the filling of the portion of the coastal lagoon between the two mouths.

Keywords: lagoonal mouth, lateral migration, longshore current, Barra do Ararapira.

RESUMO A desembocadura lagunar do Ararapira conecta o oceano ao corpo lagunar do Ararapira (Mar do Ararapira), o qual apresenta orientação SSW-NNE, paralelo à linha de costa. Esta desembocadura vem apresentando um processo contínuo de migração lateral no sentido SW. O sentido predominante da corrente de deriva litorânea longitudinal é NE e está relacionado à passagem de frentes frias. A ausência prolongada deste efeito meteorológico causa variações temporárias no padrão de ondas, que induzem à inversão periódica no sentido da corrente de deriva. Considerando-se esta inversão, são sugeridos dois modelos de circulação das correntes de maré e dos sedimentos, na desembocadura lagunar do Ararapira, que atuando alternadamente provocariam a migração desta no sentido inverso ao da corrente de deriva. Quando o sentido da deriva é NE, os processos que atuam na margem erosiva da desembocadura, durante a maré vazante, são semelhantes aos que ocorrem na margem côncava de um meandro, sendo as areias depositadas no delta de maré vazante (delta de deriva litorânea). No entanto, quando ocorre a inversão no sentido da deriva, as areias que formam o delta de deriva litorânea são erodidas pela ação das ondas e depositadas, durante a maré enchente, na margem que está em processo de acreção. Estas areias seriam depositadas nesta margem em decorrência do bloqueio da deriva, pelo fluxo da corrente de maré vazante (efeito molhe hidráulico). As margens do corpo lagunar do Ararapira apresentam pontos de erosão, principalmente na margem localizada no esporão que separa o corpo lagunar do oceano, podendo com o avanço deste processo, ocorrer uma ruptura que originaria uma nova desembocadura. Este fato, juntamente com a progressiva elongação do corpo lagunar devido ao crescimento lateral do esporão do Ararapira, levaria à abertura de uma nova desembocadura mais a NE da atual e ao assoreamento de parte do corpo lagunar localizado entre as duas desembocaduras, a antiga e a recente.

Palavras-chave: desembocadura lagunar, migração lateral, corrente de deriva litorânea longitudinal, Barra do Ararapira.

INTRODUÇÃO A desembocadura, denominada Barra do Ararapira, constitui o limite entre os estados de São Paulo e Paraná. Ela conecta o oceano ao corpo lagunar, aqui informalmente referido como “Mar do Ararapira”, que é um corpo d’água de orientação SSW-NNE, paralelo à linha de costa, com largura média aproximada de 400 m e extensão em torno de 16 km (Fig. 1). O Mar do Ararapira está separado do oceano por um estreito esporão cuja largura não ultrapassa os 800 m e que apresenta três estreitamentos localizados nas margens côncavas do esporão com o corpo lagunar (Fig. 2).

Em torno do Mar do Ararapira ocorrem planícies costeiras com cordões litorâneos formadas durante o Quaternário (Angulo 1992). Os sedimentos que compõem estas planícies são principalmente sedimentos arenosos praias e eólicos.

Segundo Tessler (1988) a desembocadura do Mar do Ararapira apresenta um processo contínuo de migração lateral no sentido SW, oposto ao da deriva litorânea predominante. Angulo (1992), comparando fotografias aéreas, identificou um deslocamento da desembocadura de aproximadamente 1200 m, entre

1953 e 1980. Alfredini (1997), utilizando mapas antigos também identificou um deslocamento no sentido SW, no período de 1868 a 1980.

Angulo (1992 e 1999) identificou deltas de maré vazante e enchente associados à desembocadura do Mar do Ararapira (Fig. 3), assim como a ocorrência de leques de sobrelevagem localizados na margem Ilha do Superagüi da desembocadura (Angulo 1999).

OBJETIVOS Os objetivos principais do trabalho são: (I) sugerir um modelo conceitual de circulação dos sedimentos e correntes de maré na desembocadura do Mar do Ararapira, inferido a partir da morfologia da desembocadura, das variações observadas nos perfis topográficos e das características oceanográficas da área e (II) estimar o tempo e avaliar as consequências da abertura de uma nova desembocadura na parte mais estreita do esporão do Ararapira.

CARACTERÍSTICAS OCEANOGRÁFICAS No litoral para-

¹ Praça Fernando Nobre, 123, CEP. 05359-260, São Paulo - SP - Brasil, e-mail: ricamarg@model.iag.usp.br, Fone: (11) 3735-5294

² Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná, Caixa Postal 19001, CEP. 81531-990, Curitiba - PR - Brasil, e-mail: angulo@geologia.ufpr.br, Fone: (41)361-3135

Figura 1 - Localização da área de estudo.

Figura 2 - Vista aérea dos três pontos mais estreitos do esporão do Ararapira em abril de 1992. A seta do meio indica o local onde foram levantados os perfis topográficos.

naense e sul paulista a maré é do tipo semi-diurna com desigualdades diurnas, ou seja, ocorrem duas preamares e duas baixamares por dia, com amplitudes diferentes. As amplitudes normais são do tipo micro-maré, em torno de 1,6 metros (LFM, 2000).

Segundo a Portobrás (1983), a partir de dados obtidos em 1982, entre Praia de Leste e a Ilha de Currais, a aproximadamente 40km a sudoeste da Barra do Ararapira, na região atuam dois trens de ondas, um proveniente de ENE e outro de SSE/SE. Marone *et al.* (1995), baseando-se num experimento feito com garrafas de deriva, concluíram que o fluxo principal das correntes de deriva litorânea na região é na direção norte. Entretanto, Alfredini (1997), baseado em observações de ondas ao largo da Ilha do Bom Abrigo, a aproximadamente 30 km ao norte da barra, objetivando a estimativa de vazão sólida, determinou que na região da Barra do Ararapira predomina o transporte de sedimentos litorâneos no sentido SW.

MÉTODOS DE TRABALHO O acompanhamento das varia-

Figura 3 - Modelos de deltas de maré na desembocadura da Barra do Ararapira. Delta de vazante: (1) barras de espraiamento; (2) lobo terminal; (3) canal de enchente marginal; (4) canal de vazante principal. Delta de enchente: (5) rampa de enchente; (6) esporão de vazante; (7) direção inferida de migração de formas de leito de 2ª ordem; (8) direção predominante inferida de deriva litorânea (Angulo 1999).

Figura 4 - Localização dos perfis topográficos nas margens da Barra do Ararapira.

ções morfológicas das margens da Barra do Ararapira foi realizado com o levantamento de seis perfis topográficos; três na margem direita, na Ilha do Superagüi, e três na margem esquerda, na Ilha do Cardoso, dispostos em padrão radial, a partir de marcos fixos locados em pontos da planície costeira (Fig. 4). Os perfis foram levantados em 28 de setembro de 1993, 14 de dezembro de 1993, 14 de dezembro de 1994, 24 de maio de 1995, 30 de maio de 1996 e 31 de maio de 1996. Nestas mesmas datas foram levantados, na porção mais estreita do esporão do Ararapira (Fig. 2), três perfis transversais à linha de costa, para-

lelos entre si e distanciados em 30m, abrangendo desde a falésia, na margem do corpo lagunar, até a linha de costa, no lado oceânico.

VARIAÇÕES DO VOLUME DE AREIA NOS PERFIS TOPOGRÁFICOS Na margem direita (SW) da desembocadura, observou-se que, no Perfil 1 (Fig. 5-A), voltado para o lado oceânico, houve predomínio da acreção de areia entre setembro de 1993 e maio de 1995 (Tabela 1), com a formação de dois cordões de dunas frontais e erosão no período seguinte, até maio de 1996, com erosão parcial do cordão de dunas frontais mais novo. No Perfil 2 (Fig. 5-B), voltado para a desembocadura, houve acreção de dezembro de 1993 a dezembro de 1994 (Tabela 1), com a formação de um cordão de dunas frontais; e predomínio de erosão até maio de 1996 que ocasionou o recuo da linha de costa e a destruição das dunas frontais mais jovens. No Perfil 3 (Fig. 5-C), voltado para o corpo lagunar, observou-se erosão no campo de dunas frontais de setembro de 1993 a dezembro de 1994 (Tabela 1).

No Perfil 4 (Fig. 5-D), voltado para o corpo lagunar e localizado na margem esquerda (NE), observou-se um processo de acreção entre setembro de 1993 e dezembro de 1994 seguido de intensa erosão até maio de 1996 (Tabela 1). Os perfis 5 e 6 (Figuras 5-E e 5-F, respectivamente), voltados para a desembocadura, apresentaram o predomínio de acreção no período monitorado (Tabela 1), com a formação de três cordões de dunas frontais e avanço da vegetação sobre a praia

Considerando as variações de volumes no período de setembro de 1993 a maio de 1996 (Tabela 1), observa-se que nos perfis voltados para a desembocadura na margem esquerda (NE) houve intensa acreção; enquanto que, nos da margem direita (SW) houve predomínio da erosão, evidenciando a migração da desembocadura na direção SW. A existência de períodos com erosão ou acreção num mesmo perfil mostram que a migração da desembocadura não é um processo contínuo, e pode reverter-se por curtos períodos dependendo das condições oceanográficas.

Na porção mais estreita do esporão do Ararapira houve diminuição da distância entre a falésia junto à margem lagunar e a linha de costa no lado oceânico, decorrente do recuo da falésia. A largura inicial média do estreito era de 44 m e passou para 36 m, num período de 32 meses, entre setembro de 1993 e maio de 1996, significando uma redução de 18% da largura do estreito. Permanecendo as taxas de erosão verificadas no período pode-se prever a ruptura do esporão num prazo de 15 anos.

MODELO CONCEITUAL DE CIRCULAÇÃO NA DESEMBOCADURA DO MAR DO ARARAPIRA Considerando as direções predominantes dos trens de ondas (Portobrás 1983) e a orientação aproximadamente N40°E da linha de costa, pode-se inferir que na região devem ocorrer correntes de deriva litorânea com sentidos opostos, dependendo da direção de ondas predominante. Isto poderia explicar os resultados conflitantes sobre o sentido das correntes de deriva litorânea obtidos por Tessler (1988), Marone *et.al.* (1995) - deriva predominante para SW - e Alfredini (1997) - deriva predominante para NE.

Durante períodos de passagem de frentes frias, as ondas predominantes são as provenientes do quadrante SE (Portobrás 1983), que induziriam correntes de deriva litorânea longitu-

Figura 5 - Levantamentos dos perfis topográficos, na margem direita (A a C) e esquerda (D a F) da Barra do Ararapira, entre setembro de 1993 e maio de 1996. Notar que os perfis não tem comprimentos iguais. (1) Setembro/93; (2) Dezembro/93; (3) Dezembro/94; (4) Maio/95; (5) Maio/96.

Tabela 1 - Balanço dos volumes de areia erodidos (-) e acrescidos (+) nas margens da Barra do Ararapira. O saldo final corresponde à somatória dos volumes de areia erodidos e acrescidos no perfil, de setembro de 1993 a maio de 1996, considerando-se o perfil como uma seção de um metro de largura.

Margem	Direção do Perfil	Volumes (m ³)				Saldo final (m ³)
		set-93 a dez-93	dez-93 a dez-94	dez-94 a mai-95	mai-95 a mai-96	
Direita (SW)	S65E	+8,2	+43,8	+36,6	-33,4	+55,2
	N45E	///	+37,5	-53,5	-115,3	-131,3
	N05W	-53,7	-35,4	+97,6	-76,6	-68,1
	N32W	+1,6	+22,3	-6,5	-24,1	-6,7
Esquerda (NE)	S52W	+4,4	+3,1	-12,1	+337,5	+332,9
	S22W	+9,3	+18,0	+66,6	+154,4	+248,3

dinal no sentido NE. Neste contexto é sugerido o primeiro modelo conceitual de circulação das correntes e de processos de erosão ou acreção nas margens na desembocadura lagunar do Ararapira:

A morfologia do corpo lagunar, paralelo à linha de costa, e a desembocadura, localizada no extremo sudoeste deste, determina que a corrente de maré vazante flua de NE para SW, sentido este inverso ao da deriva predominante (Fig. 6-A); a inversão no sentido do fluxo, que ocorre na desembocadura, faz com que o padrão de circulação da corrente de vazante se assemelhe ao fluxo d'água num meandro.

Os ventos provenientes do quadrante sul, com intensidade superior a 6 m/s e duração de no mínimo 20 horas (Ricardo de Camargo; IAG-USP, comunicação pessoal), tem o papel de aprisionar água dentro do corpo lagunar, provocando um quadro anômalo de elevação do nível d'água; se os ventos cessarem num período coincidente com o de marés de sizígia, haverá um incremento no fluxo da corrente de maré vazante (Tessler & Mahiques 1993).

A corrente de vazante, ao se propagar pela desembocadura, atinge o delta de maré vazante e sofre uma inflexão para NE causada, em parte, pela ação da deriva no sentido NE e, em parte, pela forma do delta de vazante, que uma vez instalado sob estas condições hidráulicas acaba também direcionando a corrente para NE. Este delta seria um delta de deriva litorânea, no sentido de Reddering (1983) (Fig. 6-A). A inflexão da corrente de maré vazante e a forma côncava da margem direita fazem com que a corrente de vazante flua preferencialmente num canal principal, junto à esta margem (Fig. 6-A). Neste percurso a corrente de maré vazante exerce grande poder erosivo na margem direita. Isto pode ser observado principalmente no perfil 2 nos períodos de dezembro de 1994 a maio de 1996 e também no perfil 1, de maio de 1995 a maio de 1996 (Figuras 5-B e 5-A, respectivamente). A areia retirada das margens possivelmente seria depositada no delta de vazante.

No lado oceânico da margem direita a acreção observada no perfil 1, de setembro de 1993 a maio de 1995 (Fig. 5-A), decorreria do bloqueio dos sedimentos transportados pela deriva litorânea, causado pelo efeito molhe hidráulico do fluxo da corrente de vazante. Pode-se notar enfim, a instalação do processo erosivo nos três perfis da margem direita a partir de maio de 1995 (Tabela 1), fazendo-se notar um recuo desta margem.

Próximo à margem esquerda (NE) há o predomínio da circulação de correntes de maré enchente, como se pode verificar através da direção de avanço para WNW de dunas subaquosas da

Figura 6 - Modelos conceituais de circulação das correntes de maré e das areias durante a atuação da corrente de deriva litorânea longitudinal rumo a NE (figura A) e rumo a SW (figura B) na desembocadura lagunar do Ararapira. (1) Formas associadas aos deltas de maré; (2) Zonas com tendência à erosão; (3) Zonas com tendência à erosão; (4) Correntes de maré vazante; (5) Correntes de maré enchente; (6) Deriva litorânea.

rampa de enchente do delta de vazante (Angulo 1999) (Figuras 3 e 6-A). A existência de uma área rasa, relacionada ao delta de maré enchente, com dunas subaquosas, que podem aflorar durante as marés baixas de sizígia, localizada em continuidade com a margem lagunar, visível nos levantamentos de dezembro de 1993 e 1994 do perfil 5 (Fig. 5-E), propicia uma zona de calmaria com propensão à acreção.

A circulação das correntes de maré enchente e vazante na

porção localizada atrás do esporão recurvado da margem direita propiciam o crescimento de um pequeno esporão arenoso no sentido SW, que encerra uma enseada (Fig. 6-A). A circulação das correntes, durante os períodos de maré alta, provoca a erosão das margens desta enseada, observado no perfil 3, tornando cada vez mais estreita a faixa de planície costeira que separa a enseada do oceano. Considerando-se que já foi observada a existência de leques de sobrelavagem nesta faixa da planície (Angulo 1999), é possível que haja neste local uma ruptura, o que ocasionaria uma aceleração brusca no processo erosivo da margem direita e migração da desembocadura para SW (Fig. 7). Após a ruptura do esporão o material seria rapidamente erodido pela ação da corrente de vazante, caracterizando um processo de recuo da linha de costa episódico.

Quando ocorrem épocas prolongadas de ausência dos ventos provenientes do quadrante sul as ondas oceânicas predo-

Figura 7 - Vista aérea dos leques de sobrelavagem, em abril de 1992, na margem direita (SW).

Figura 8 - Vista aérea da Barra do Arapira em 1996. À esquerda (SW) a Ilha do Superagüi e à direita (NE) a Ilha do Cardoso. Nota-se nesta margem, os bancos arenosos semi-submersos, visíveis pelo padrão de arrebenção das ondas, relacionados com o delta de maré enchente. (Foto. Guilherme C. Lessa, Laboratório de Estudos Costeiros, CPGG-IGEO-UFBA).

minantes provêm de ENE, induzidas por ventos associados ao Anticiclone do Atlântico Sul (Portobrás 1983). Neste contexto espera-se a inversão da deriva litorânea, que passaria a ter sentido SW. Nesta situação, o segundo modelo de circulação das correntes seria o seguinte:

O crescimento da margem esquerda (NE) se daria pela acresção de areias transportadas pela corrente de deriva litorânea longitudinal, e bloqueadas pela corrente de maré vazante (Fig. 8). Este crescimento seria acelerado pela coalescência da praia com a rampa de enchente do delta de maré, localizados próximo à margem (Fig. 3), como pode ser observado comparando os levantamentos de dezembro de 1994 e maio de 1996 do perfil 5 (Fig. 5-E); o delta de deriva pode se romper na área mais próxima à margem direita (SW), formando um segundo canal de circulação da corrente de maré vazante (Fig. 6-B).

Na margem direita (SW) ainda prevaleceria a erosão, causada pelo efeito meandro e pela falta de suprimento de sedimentos transportados pela deriva litorânea rumo a SW, que estariam sendo bloqueados pelo efeito molhe hidráulico da corrente de vazante.

Aplicando à área o modelo elaborado por FitzGerald (1988) sobre migração de desembocadura e rompimento de esporão (*lagoonal mouth migration and spit break*), pode-se considerar que: a) a migração lateral da desembocadura no sentido SW, provoca a elongação do corpo lagunar e do esporão do Ararapira, o que causaria a gradativa ineficiência do fluxo da maré vazante no corpo lagunar; b) há a previsão da abertura de uma nova desembocadura, pela erosão da margem côncava do esporão do Ararapira na sua parte mais estreita (Fig. 2); c) a nova desembocadura a NE da atual, formada após o rompimento do esporão facilitaria o fluxo das correntes de maré, propiciando o fechamento da atual desembocadura e o assoreamento da parte do corpo lagunar localizado entre as duas desembocaduras (Fig. 9).

Figura 9 - Modelo conceitual de abertura de uma nova desembocadura do Mar do Arapira baseado no modelo de "migração de desembocadura e rompimento do esporão" de FitzGerald (1988).

Agradecimentos Ao Laboratório de Oceanografia Geológica, Centro de Estudos do Mar e ao Departamento de Geologia da Universidade Federal do Paraná, ao Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social – IPARDES, ao Laboratório de Sedimentologia do Instituto de Geociências da Univer-

sidade de São Paulo; à CAPES, pela concessão de Bolsa de Mestrado, e ao CNPq (processo nº 522079/95-4), ao Projeto Evolução Geológica e Mineralização-3, FINEP/PADCT-UFPR (nº 6591030300) pelo apoio financeiro e aos revisores da RBG pelas sugestões ao manuscrito.

Referências

- Alfredini P. 1997. Transporte de sedimentos litorâneos na Praia do Ararapira (Estado de São Paulo, Brasil). In: Simp. Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, 3. Maputo, Moçambique
- Angulo R.J. 1992. *Geologia da Planície Costeira do Estado do Paraná*. Inst. de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 334p.
- Angulo R.J. 1995. Feições Depositionais associadas às desembocaduras dos complexos estuarinos da costa paranaense. In: ABEQUA, Congr. Assoc. Bras. Est. Quat., 5, Niterói, RJ, *Resumos Expandidos*, 58-64
- Angulo R.J. 1999. Morphological characterization of the tidal deltas on the coast of the State of Paraná. *Anais Acad. Bras. Ciências*, São Paulo, 71(4-II):935-959
- FitzGerald D.M. 1988. Shoreline erosional-depositional process associated with tidal inlets. Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies. In: D.G. Aubrey & L. Weishar (eds.) *Hydrodynamics and Sediment Dynamics of Tidal Inlets*, 29:186-225
- LFM – Laboratório de Física Marinha. 2000. Marés do Paraná. Centro de Estudos do Mar, UFPR, <http://www.cem.ufpr.br/fisica/mare-pr.htm>
- Marone E., Paula Prata Jr.V., Klinguenfuss M.S., Camargo R. 1995. Correntes de deriva no litoral paranaense: um caso de estudo. In: Congr. Lat. Amer. Cien. Mar, 6. Mar del Plata, Argentina, Item 475:129
- Portobrás - Empresa de Portos do Brasil S.A. 1988. Relatório de apresentação das medições meteorológicas observadas em Pontal do Sul, Paranaguá-PR, período set.1982 a dez. 1986. Rio de Janeiro, INPH. 189p.
- Reddering J.S.V. 1983. An inlet sequence produced by migration of a small microtidal inlet against longshore drift: the Keurbooms Inlet, South Africa. *Sedimentology*, 30:201-218
- Tessler M.G. 1988. *Dinâmica sedimentar quaternária no litoral sul paulista*. Inst. de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 277p.
- Tessler M.G. & Mahiques M.M. 1993. Utilization of coastal geomorphic features as indicators of longshore transport: Examples of the southern coastal region of the State of São Paulo, Brasil. *J. Coast. Res.*, 9:823-830

Manuscrito A-1235

Recebido em 18 de junho de 2001

Revisão dos autores em 22 de junho de 2002

Revisão aceita em 25 de junho de 2002