

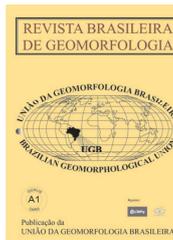


www.ugb.org.br
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 17, nº 3 (2016)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v17i3.845>



GÊNESE E MORFODINÂMICA DAS BARREIRAS ARENOSAS NO FLANCO NORTE DO DELTA DO RIO PARAÍBA DO SUL (RJ)

ORIGIN AND MORPHODYNAMICS OF SANDY BARRIERS IN NORTHERN FLANK OF THE PARAIBA DO SUL RIVER DELTA (RJ)

Sérgio Cadena de Vasconcelos

*Departamento de Geografia e Meio Ambiente, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
Rua Marquês de São Vicente, 225, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, CEP: 22453-900, Brasil
Email: sergio-cadena@puc-rio.br*

Thaís Baptista da Rocha

*Departamento de Geografia Física, Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Rua São Francisco Xavier, 524, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, CEP: 20550-01, Brasil
Email: thaiste5@yahoo.com.br*

Thiago Gonçalves Pereira

*Departamento de Geografia Física, Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Rua São Francisco Xavier, 524, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, CEP: 20550-01, Brasil
Email: thiagopereira.uerj@gmail.com*

Albano Ribeiro Alves

*Diretoria de Hidrografia e Navegação, Marinha do Brasil
Rua Barão de Jaceguai, s/nº, Niterói, Rio de Janeiro, CEP: 24048-900, Brasil
Email: albano900@gmail.com*

Guilherme Borges Fernandez

*Departamento de Geografia, Universidade Federal Fluminense
Av. General Milton Tavares de Souza, s/nº, Niterói, Rio de Janeiro, CEP: 24210-346, Brasil
Email: guilhermefernandez@id.uff.br*

Informações sobre o Artigo

Recebido (Received):
04/09/2015
Aceito (Accepted):
08/05/2016

Palavras-chave:

Esporão Arenoso; Batimetria;
Delta Assimétrico.

Keywords:

Spit; Bathymetry; Asymmetric
Delta.

Resumo:

A formação de barreiras arenosas é comum em deltas dominados por ondas, associada ao expressivo aporte sedimentar dos rios. Nesses ambientes é possível o desenvolvimento de barreiras do tipo spit, ilha-barreira e sistema barreira-laguna. Historicamente essas feições foram associadas ao desenvolvimento assimétrico dos deltas e ao papel da deriva litorânea. Nesse sentido, o objetivo do presente trabalho é investigar a gênese e a morfodinâmica das barreiras arenosas que ocorrem no flanco norte do delta do rio Paraíba do Sul, considerando aspectos relacionadas às porções submarina e emersa do delta. Foram calculados dados de ondas e sentido de transporte litorâneo; coletados perfis batimétricos junto à costa, perfis topográficos na barreira emersa e mapeamento em planta a partir de sensoriamento remoto sobre imagens de alta resolução espacial. Foi possível

identificar, em escala de detalhe, estágios de desenvolvimento e evolução associados à formação de barras submarinas na frente deltaica; a emersão de barreira arenosa na forma de spit; a progradação lateral a partir das correntes de deriva litorânea; e a conexão do spit ao continente, passando a isolar um sistema lagunar. Este processo foi considerado como um dos mecanismos de gênese de cristas de praia que formam a planície deltaica ao norte do rio Paraíba do Sul. Recentemente, tais feições e processos têm sido interpretados como decorrente de um padrão de ondas assimétricas que chegam à linha de costa com ângulo de obliquidade elevado, produzindo as feições de instabilidade e a assimetria do delta.

Abstract:

The sand barriers are common in deltas dominated by waves, associated with significant sediment input from rivers, such as spit, island-barrier and barrier-lagoon system. Historically these features were associated with asymmetric development of deltas and the longshore currents in areas adjacent to the mouths of rivers. In this sense, the objective of this study is to investigate the genesis and the morphodynamics of sandy barriers in the northern flank of the Paraíba do Sul River delta, considering aspects related to the subaqueous and subaerial components. The wave data and transport sediments direction were calculated; bathymetric and topographic profiles were used and mapping from remote sensing with high-resolution images. It was identified, in detail scale, stages of development and evolution associated with the submarine bars in delta front; sandy barrier emersion as spit; lateral progradation from longshore currents; and spit connection to the mainland, isolating the lagoon system. This process was regarded as one of the mechanisms of the beach ridges genesis that form the deltaic plain. Recently, such features and processes have been interpreted as resulting from a pattern of asymmetric waves that attains the coastline with the high obliquity angle, producing instability features and delta asymmetry.

1. Introdução

Há cerca de 450 a.C., Heródoto notou a similaridade entre a letra grega “Δ”, denominada “delta”, com a forma da acumulação sedimentar formada ao redor da desembocadura do rio Nilo. Apesar de muitos deltas não apresentarem esta particular morfologia, o termo permaneceu (SUTER, 1994). Mesmo considerando a configuração morfológica variável, os deltas podem ser definidos como acumulações costeiras subaéreas e submarinas que se desenvolvem próximo às desembocaduras fluviais, cujos sedimentos são remobilizados secundariamente por ondas, por correntes e por marés.

Considerando a influência das forçantes hidrodinâmicas na morfologia e na configuração espacial da arquitetura deposicional dos deltas, Galloway (1975) agrupou os deltas num modelo tripartite, classificando-os como dominados por ondas, por marés ou por rios. Apesar de ainda ser amplamente utilizado, o modelo pode não parecer adequado na classificação de alguns deltas, conforme ressaltaram Orton e Reading (1993), Dominguez (1996), Bhattacharya e Giosan (2003); Nanson *et al.* (2013) e Anthony (2015). Há dificuldades, por exemplo, no caso de deltas com muitos lobos deltaicos ativos, como o delta do rio Danúbio, ou ainda no caso de diferenciar deltas dominados por marés de

feições estuarinas.

Especificamente, no caso dos deltas dominados por ondas, é comum a formação de barreiras costeiras arenosas (*Costal Sandy Barriers*) associadas ao expressivo aporte sedimentar dos rios e ao retrabalhamento decorrente da ação das ondas. Esses sedimentos são transportados ao longo da costa e frequentemente são depositados sob a forma de cristas de praia, e passam a formar as extensas planícies costeiras de arquitetura sedimentar regressiva (*strandplains*) (FERNANDEZ e ROCHA, 2015; OTVOS, 2012; DILLENBURG e HESP, 2009; ROY *et al.*, 1994). A contínua sedimentação resulta no avanço da linha de costa, formando uma protuberância nas proximidades da desembocadura que assume uma morfologia em cúspide a partir da foz (Figura 1). Neste modelo, considerado como dominado por ondas, encontram-se os principais deltas brasileiros.

Nos deltas, também podem se desenvolver outros tipos de barreiras arenosas como o esporão arenoso (*spit*), quando apenas uma extremidade da barreira está conectada ao continente; a ilha-barreira, quando nenhuma das extremidades é conectada ao continente; ou ainda o sistema barreira-laguna, quando as duas extremidades estão conectadas ao continente. Normalmente, nestes casos de barreira é comum a presença

de pequenas baías, lagunas e até o desenvolvimento de manguezais. Bhattacharya e Giosan (2003) interpretaram estes elementos morfológicos como feições secundárias do ambiente deltaico, uma vez que são menos comuns e expressivos que a ocorrência das cristas de praia.

Essas feições secundárias foram associadas ao desenvolvimento assimétrico dos deltas dominados por ondas, conforme apontaram Dominguez (1996) e Bhattacharya e Giosan (2003). De acordo com os autores, a maior crítica ao modelo de Galloway (1975) era a ausência do papel do transporte de sedimentos pela deriva litorânea, o que os levou a considerar o efeito do “molhe hidráulico” (ver KOMAR, 1973). De acordo com este modelo, os sedimentos transportados pela deriva litorânea seriam bloqueados pela ação hidráulica do rio próximo à desembocadura. Como resultado, haveria distribuição granulométrica e formas de progradação diferenciadas nos flancos dos deltas, com a formação de sucessivas cristas arenosas no flanco sul do delta e o desenvolvimento de esporões arenosos (*spits*) e sistemas barreira-laguna no flanco norte. Como exemplos de deltas assimétricos descritos por Bhattacharya e Giosan (2003) estão o delta do Danúbio (Romênia), do Brazos (EUA), do Nilo (Egito) e os deltas brasileiros, como os dos rios Paraíba do Sul, São Francisco, Doce e Jequitinhonha.

Recentemente, o desenvolvimento dos *spits* em áreas deltaicas foram mapeados e investigados por Rodriguez *et al.* (2000), Van Maren (2005), Dan *et al.* (2011) e Vespremeanu-Stroe e Preoteasa (2015), que associaram a sua ocorrência à formação de barras submarinas. A partir de modelagem numérica, Dan *et al.* (2011) produziram um modelo para o desenvolvimento dessas barreiras arenosas envolvendo fluxo fluvial, ondas, transporte de sedimentos e alterações morfológicas em diversas escalas temporais, associado ainda a mecanismos de retroalimentação.

Os autores verificaram quatro principais estágios de evolução: 1) acumulação submarina próxima à frente deltaica; 2) emersão de barreira arenosa na forma de *spit*; 3) progradação lateral a partir das correntes de deriva litorânea; 4) conexão do *spit* ao continente, passando a isolar um sistema lagunar, até novamente recomeçar o ciclo com uma nova acumulação submarina na frente deltaica. Ainda segundo esses autores, as ondas seriam a principal variável que define o

desenvolvimento ou não dos *spits*, porém, ressaltam que a sua formação só é possível quando o suprimento sedimentar excede a capacidade das ondas em induzir o transporte, destacando, portanto, a importância do aporte fluvial.

Considerando o delta do rio Paraíba do Sul como um exemplo de delta assimétrico dominado por ondas, discutido internacionalmente conforme descreveram Bhattacharya e Giosan (2003), o objetivo do presente trabalho é investigar a origem e a morfodinâmica das barreiras arenosas que se desenvolvem no flanco norte do respectivo delta, considerando aspectos geomorfológicos relacionados às porções submarina e emersa do delta e aspectos hidrodinâmicos relacionados a ondas e transporte sedimentar. Inicialmente, a emersão das barras submarinas no presente delta foi descrita por Dias e Gorini (1979) e Dias *et al.* (1984), embora o desenvolvimento e a evolução não tenham sido mapeados na escala de detalhe. Desta forma, espera-se que este trabalho venha a contribuir para interpretações e discussões a cerca do comportamento morfodinâmico do delta, das características geomorfológicas e do desenvolvimento da assimetria em planta.

2. Área de estudo

A bacia do rio Paraíba do Sul drena uma área equivalente a 55.500 km², perpassando pelos estados de São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro sendo, neste último, o local da desembocadura e da formação da feição deltaica. Em termos geológicos, o delta do rio Paraíba do Sul é limitado pelos tabuleiros do Grupo Barreiras (Figura 1) e sua formação foi condicionada pelo aporte sedimentar do rio e pelas condições de diminuição do nível relativo do mar nos últimos 5.000 anos, conforme descrito por Dias e Gorini (1980); Dominguez *et al.* (1981); Martin *et al.* (1984); Silva (1987) e Bastos (1997).

A área de estudo localiza-se na margem norte do delta do rio Paraíba do Sul, na região do norte fluminense, abarcando o município de São Francisco de Itabapoana e concentrado no distrito de Gargaú. Em termos geomorfológicos, faz parte da planície costeira formada principalmente por sistemas de cristas de praia e que são intercaladas por largas depressões, caracterizadas por terrenos argilosos, sendo comum a presença de brejos, lagoas e manguezais. Estas depressões aparecem

mapeadas em parte como planícies fluvio-marinhas na figura 1. Cabe ressaltar que esta descrição contrasta com as características da planície no flanco sul, onde

as cristas de praia possuem dimensões mais regulares, as depressões são menos evidentes e há ausência de feições como lagunas.

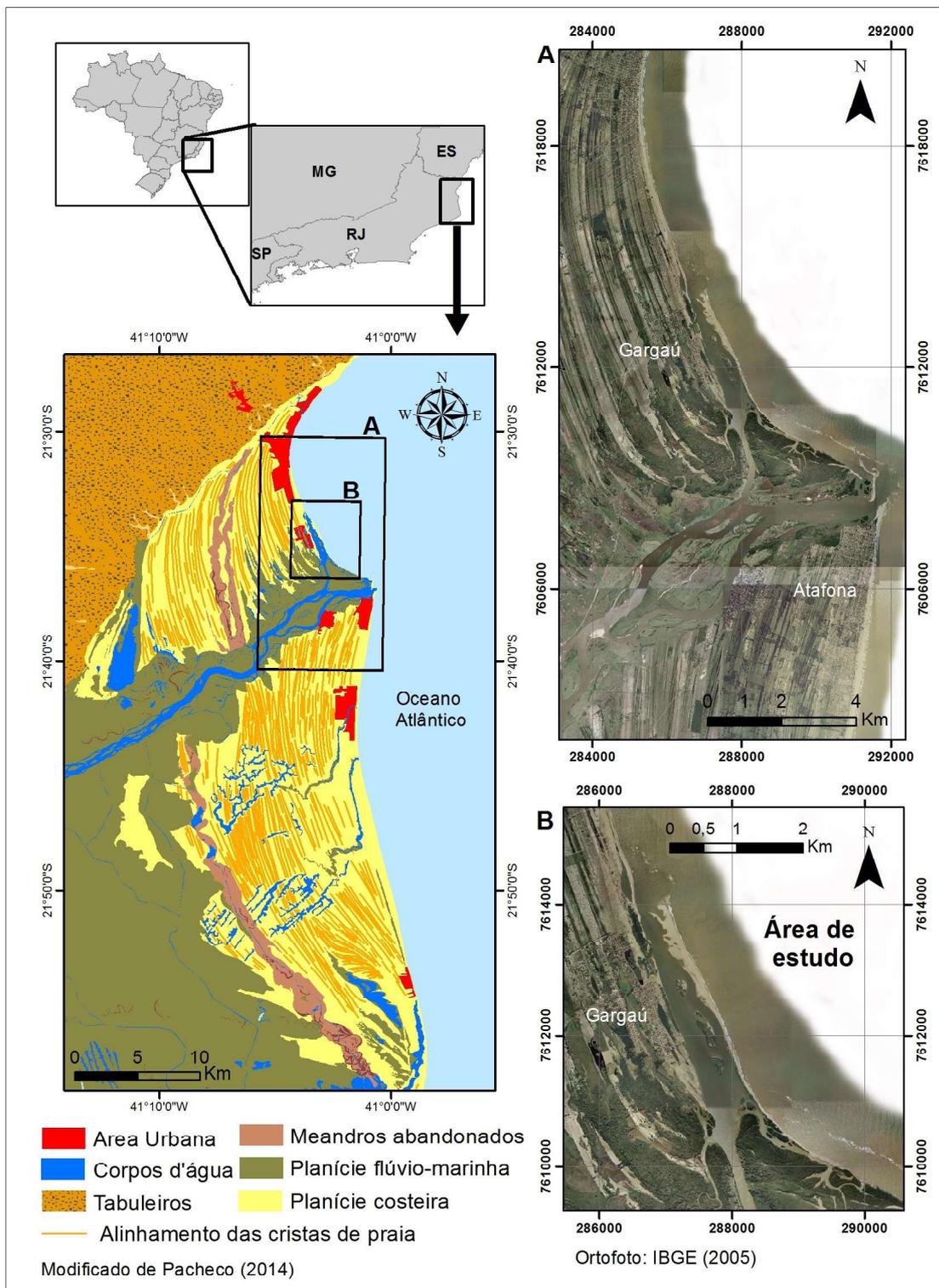


Figura 1 - Mapeamento geomorfológico do delta do rio Paraíba do Sul (Modificado de Pacheco, 2014). Notar a característica assimétrica do delta com um flanco mais extenso que outro e a ocorrência de feições diferenciadas. Destaque para a área A, com a ocorrência das depressões mais desenvolvidas na borda norte, entremeadas por brejos e manguezais, que fazem parte da classificação “planície fluvio-marinha”. Destaque para a área B, com delimitação da área de estudo e a ocorrência da barreira arenosa na forma de spit.

A morfologia na margem norte do delta já havia sido descrita por Lamego (1945) que já citava as largas depressões como registros de antigas lagunas colmatadas e ressaltava o avanço da linha de costa, tomando como referência a vila de Gargaú. Segundo o autor, em 1928, a vila ficava junto ao mar quando uma nova barreira surgiu, deixando uma lagoa entre a barreira recém-formada e a respectiva vila. Neste processo foi estimado um avanço da linha de costa de cerca de 200 m. Mais recentemente, uma nova barreira foi formada, conforme mostra a figura 2.

Com relação às características oceanográficas, a maior frequência da direção de incidência de ondas está associada a ventos locais do quadrante NE, ocorrendo ainda ondas provenientes dos quadrantes SE e S, relacionadas a frentes frias. A altura média das ondas varia entre 1,6 e 2 m. No caso de ondas superiores a 3 m, estas são mais frequentes oriundas dos quadrantes S e SE (SOUZA, 1988; PINHO, 2003). O padrão de marés é semi-diurno, alcançando até 1,3 m na maré alta de sizígia e 0,3 m na maré baixa configurando, portanto,

amplitude de micro-maré, o que ressalta o domínio da ação das ondas na dinâmica do delta.

Considerando que as ondas são a principal forçante no desenvolvimento das correntes de deriva litorânea, o delta do Paraíba do Sul é alvo de discussões no que diz respeito ao sentido da deriva nas proximidades da foz. Para Dominguez (1996), o sentido predominante da deriva seria de Sul para o Norte, o que levaria ao desenvolvimento do efeito do “molhe hidráulico”. Já para Dias e Gorini (1980) e Cassar e Neves (1993) o transporte residual de sedimentos ocorre num padrão divergente a partir da foz, sendo de Norte para o Sul no flanco Sul e de Sul para o Norte, no flanco Norte.

3. Materiais e Métodos

3.1 Ondas e transporte sedimentar

Dados de ondas da Bacia de Campos foram gerados pelo modelo WAM entre os anos de 2004 e 2007 e foram utilizados para analisar o transporte litorâneo ao longo da planície. A expressão utilizada



Figura 2 - Barreira arenosa, na forma de spit, desenvolvida recentemente na margem norte do delta. Notar o distrito de Gargaú limitado por uma lagoa em processo de colmatção e uma barreira interna pretérita. Fonte: VASCONCELOS (2010), modificado da foto original do IBAMA – Campos (2005).

para o cálculo do transporte potencial foi a de KOMAR (1973; 1976) (Equação 1). O termo “potencial” é utilizado porque os cálculos assumem que haja sedimentos disponíveis em quantidade suficiente para o transporte e que não existam obstruções que reduzam ou interrompam a deriva litorânea. Conhecendo-se os parâmetros de onda e as características dos sedimentos e da antepraia, a fórmula permite que seja calculado o transporte para cada intervalo de tempo. Equação 1:

$$Q_s = K \left(\frac{\rho \sqrt{g}}{16 \gamma^{1/2} (\rho_s - \rho)(1 - n)} \right) H_b^{5/2} \text{sen}(2\varphi_b) \quad (1)$$

onde:

ρ = Massa específica da água, igual a 1.042kgm⁻³, a temperatura e a salinidade consideradas foram de 25°C e 60;

ρ_s = Massa específica do sedimento, igual a 2.650 kgm⁻³;

g = Aceleração da gravidade de 9,81 ms⁻²;

γ = Índice de arrebentação $\frac{H_b}{d_b}$, onde d_b é a profundidade de arrebentação;

K = Coeficiente de calibração igual a 0,32;

n = Porosidade= 0,6

Com o objetivo de se determinar a influência em longo prazo do gradiente de transporte litorâneo na evolução do delta, foi calculado o transporte residual com os resultados da reconstituição do clima de ondas de um ano, através do somatório dos transportes instantâneos. Assim, convencionou-se que o transporte da esquerda para a direita seria positivo e no sentido contrário negativo, assumindo-se um observador olhando na direção do azimute da normal à linha de costa. Esse cálculo foi feito em 30 pontos ao longo da Planície Costeira do Paraíba do Sul.

Como as fórmulas de transporte usualmente utilizam os parâmetros de onda no início da zona de arrebentação é necessário o cômputo dos efeitos de refração e empinamento. O método mais simples consiste na assunção de que as isobatimétricas são retas e paralelas à linha de costa desprezando-se, ainda, os efeitos de dissipação de energia devido à fricção no fundo. Dessa forma, utilizando-se a lei de Snell e assumindo-se a conservação do fluxo de energia da onda, a altura e a direção das ondas na arrebentação podem ser calculadas pelo par de equações

descritas por USACE (2002), na equação 2 e 3:

$$H_b = H_l^{4/5} (C_{gl} \cos \varphi_l)^{2/5} \left[\frac{g}{\gamma} - \frac{H_b g^2 \sin^2(\varphi_l)}{\gamma^2 C_l^2} \right]^{1/5} \quad (2)$$

$$\cos \varphi_b = \sqrt{g \frac{H_b}{\gamma} \frac{\sin \varphi_l}{C_l}} \quad (3)$$

onde:

H_b = Altura de onda fora da arrebentação;

C_{gl} = Celeridade de grupo de onda fora da arrebentação;

φ_l = Ângulo de incidência da linha de crista de onda em relação à linha de costa fora da arrebentação;

C_l = Celeridade de onda fora da arrebentação.

3.2 Materiais e métodos aplicados à porção submarina

Com o objetivo de obter informações detalhadas sobre a morfologia das feições que se desenvolvem na zona submarina, assim como de seu comportamento/ evolução, foram realizados levantamentos batimétricos em um trecho do litoral compreendido entre a foz e o extremo norte da área de estudo. Os levantamentos abrangeram uma área que se estende cerca de 11 km na direção norte-sul e se afasta aproximadamente 1,5 km da costa atingindo profundidades de até 10 m (Figura 3).

Cabe destacar que, em virtude da impossibilidade do uso do ecobatímetro para investigação do setor submerso, foi utilizado para a mesma função o perfilador de sub-fundo 10 KHz modelo *StrataBox*, considerado um equipamento de investigação geofísica de alta resolução. Neste caso, a batimetria foi extraída a partir da interpretação do refletor superficial presente nos perfis sísmicos. O perfilador sísmico foi preso na lateral da embarcação onde também foi posicionado um receptor GPS para a aquisição das coordenadas do levantamento, em UTM referente ao fuso 24S, no datum WGS-84.

Com a intenção de realizar uma caracterização inicial da área submersa e de levantar uma quantidade razoável de dados para a geração de um modelo batimétrico local, foram realizados cerca de 30 perfis sísmicos em 2007. Após uma análise dos dados coletados foram escolhidos alguns perfis transversais à costa mais representativos da morfologia submarina (Figura 3). O mapa batimétrico por sua vez foi gerado no *software ArcGIS 9.3* utilizando-se a extensão *Spatial Analyst* e o interpolador *Inverse Distance Weighted*.

3.3 Materiais e métodos aplicados à porção emersa

Visando um melhor acompanhamento do comportamento do sistema barreira-laguna, foram definidos três perfis transversais ao arco praial (Figura 3). Esses perfis acompanham em superfície o posicionamento e a orientação dos três perfis batimétricos localizados no extremo norte da área de estudo. O monitoramento do perfil emerso foi realizado seguindo o método de nivelamento topográfico tradicional e mais recentemente com Estação Total. Em alguns levantamentos, o perfil foi estendido até a zona submarina com auxílio de mergulhador, dependendo das condições do mar. As cotas altimétricas de referência

de nível foram ajustadas ao nível médio do mar, seguindo orientações contidas em Muehe *et al.* (2003). O monitoramento foi iniciado no ano de 2008 e continua até os dias atuais, com a realização de um levantamento por ano em média.

Para o mapeamento em planta da barreira arenosa, foram utilizadas imagens de satélite ALOS pancromáticas dos anos de 2007 e 2008, com resolução espacial de 5 m; fotografias aéreas do ano de 2000, com resolução espacial de 1 m; e imagem Ikonos do ano de 2004, com resolução espacial de 1 m. As imagens foram georreferenciadas no *ArcGis 9.3* e a feição da barreira arenosa foi mapeada por vetorização no mesmo programa.

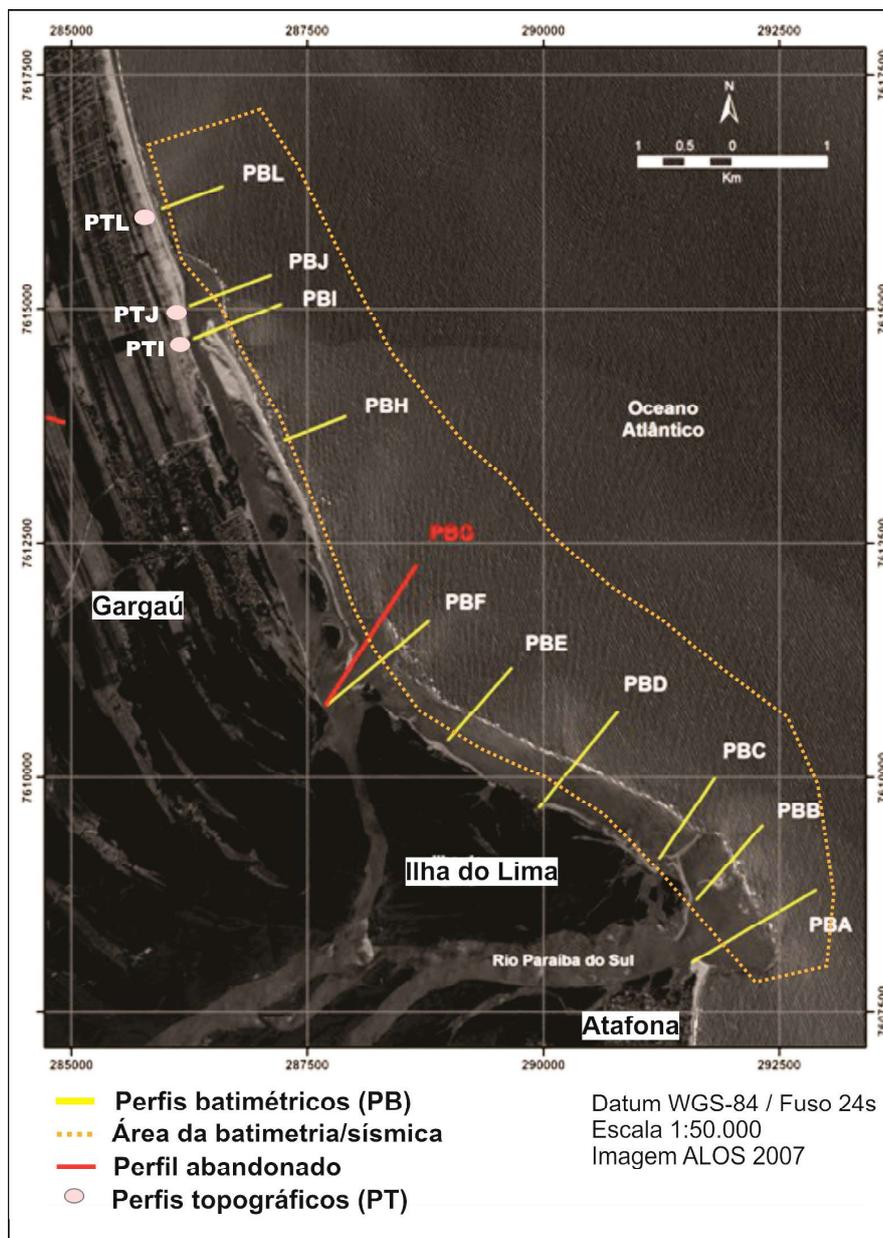


Figura 3 - Localização dos perfis batimétricos (PB) e topográficos (PT) da parte emersa do flanco norte do delta do rio Paraíba do Sul.

4. Resultados e discussões

4.1 Ondas e transporte sedimentar

Os dados de ondas referentes ao modelo WAN na Baía de Campos indicaram um padrão bimodal, com direção de propagação de pico entre NE e SE, altura significativa de onda de 1 m, período de onda entre 6 e 8 segundos para o quadrante NE e de 8 a 10 para o quadrante de SE. Tais resultados corroboram Souza (1988) que relacionou a bimodalidade à superposição de um mar local, formado principalmente pelas ondas de NE, com um marulho formado por ondas do quadrante Sul, relacionadas aos sistemas frontais.

Os resultados de transporte litorâneo indicaram um padrão divergente nas proximidades da desembocadura do rio Paraíba do Sul, com sentido do transporte voltado para Sul, no flanco Sul e para Norte, no flanco Norte, corroborando, desta forma, o modelo de Cassar e Neves (1993) e Dias e Gorini (1980). Cabe ressaltar que, neste caso, não poderia ocorrer o efeito do “molhe hidráulico”, considerado uma das causas do desenvolvimento da assimetria do delta e de feição como *spits* e lagoas, conforme defendido por Dominguez *et al.* (1996) e Martin *et al.* (1984). Já no extremo do flanco norte do delta, o padrão encontrado do transporte litorâneo foi no sentido Sul, formando uma área de convergência de transporte sedimentar.

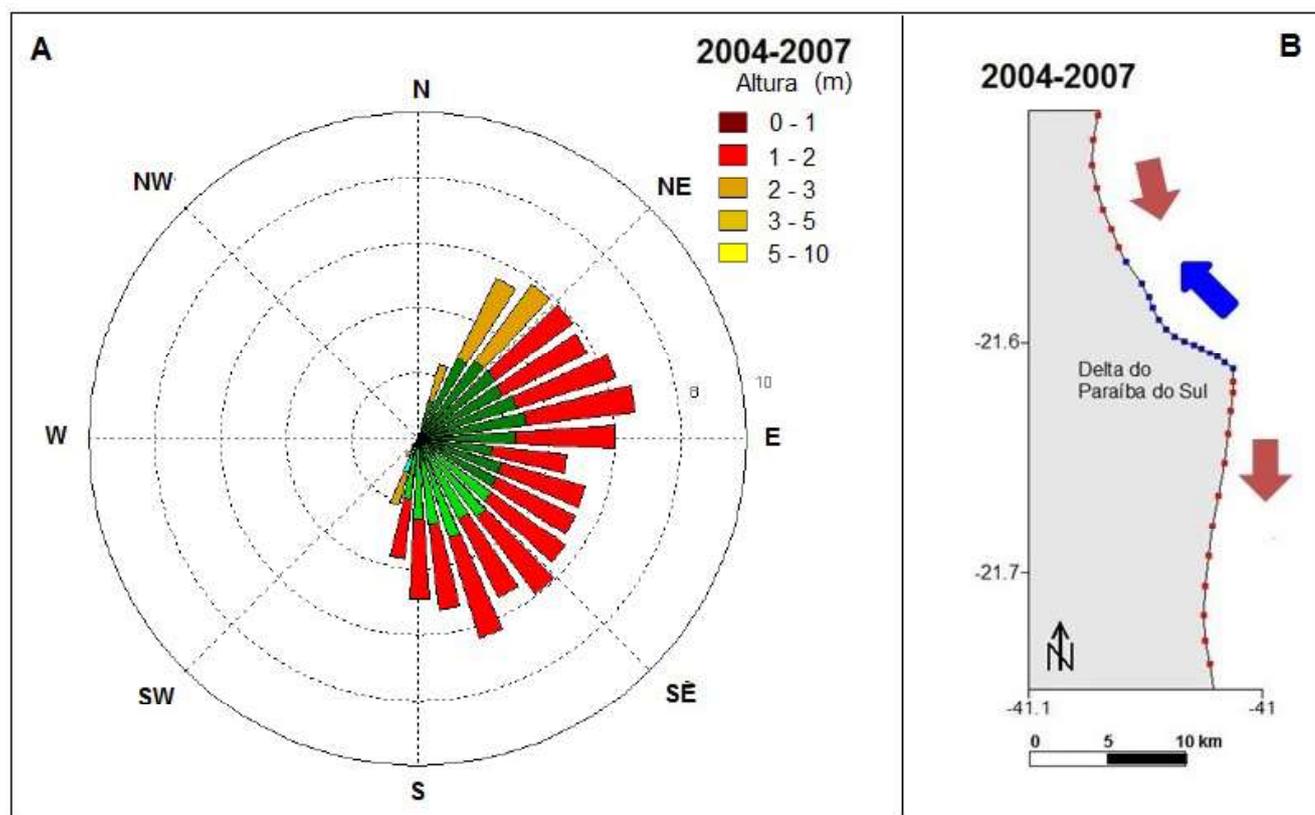


Figura 4 - (A) Distribuição de ondas entre os anos de 2004 e 2007 na Baía de Campos que caracterizou um padrão bimodal no período analisado. (B) Sentido predominante do transporte litorâneo no delta do rio Paraíba do Sul entre os anos de 2004 e 2007. Notar o padrão divergente próximo à foz e um padrão convergente no flanco norte do delta.

4.2 Morfologia na porção submarina

Considerando os resultados das sete linhas batimétricas mais representativas, as características morfológicas observadas na antepraia mostram que, ao longo da linha de costa, irregularidades morfológicas são marcantes na fisiografia submarina. Este cenário está associado a condições distintas de influência fluvial, de ondas e do posicionamento geográfico.

O perfil batimétrico PBC, localizado imediatamente a frente da desembocadura do canal principal mostra, a partir do continente, o desenvolvimento de um proeminente banco de areia que se desenvolve tipicamente na porção da frente deltaica, a partir da sedimentação arenosa oriunda diretamente do rio (Figura 5). Observa-se a topografia suavizada na parte voltada para o continente e aumento do gradiente em

direção ao pró-delta, cuja sedimentação está associada à decantação de sedimentos lamosos, conforme mapeado por Murillo *et al.* (2009). Já no perfil PBD, destacam-se um conjunto de pelo menos quatro barras submarinas, que se desenvolvem com a ação do retrabalhamento dos

sedimentos provenientes do banco mapeado no perfil anterior pela ação de ondas. No perfil PBE, as múltiplas barras visualizadas no perfil PBD parecem se auto-organizar em uma única barra, mais robusta e próxima ao continente, conforme mostrado na figura 4.

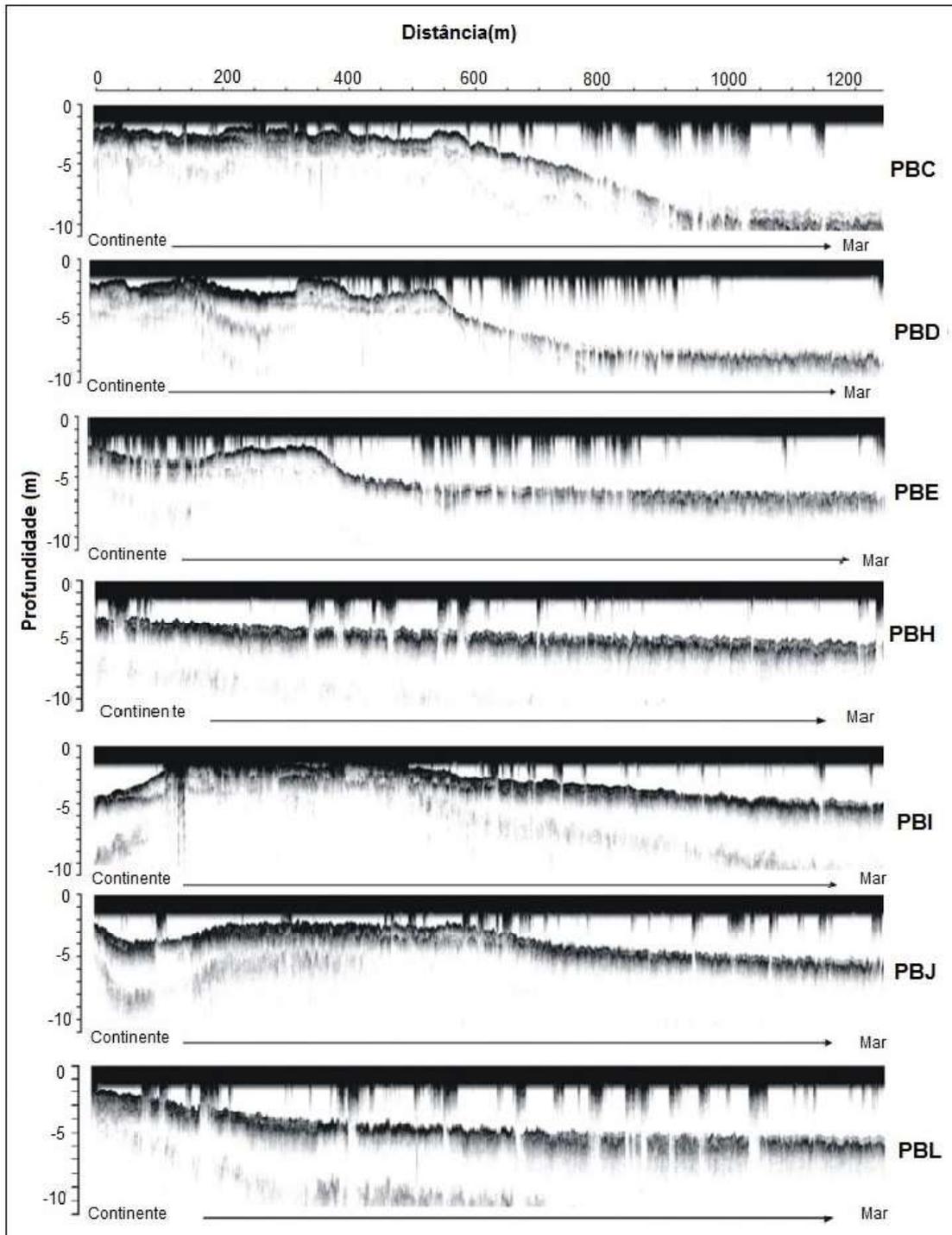


Figura 5 - Perfis batimétricos adquiridos com o perfilador sísmico de 10 KHz, modelo StrataBox. Notar a presença das barras submarinas (PBC e PBD), que se auto-organizam numa única barreira (PBE) e emerge à superfície (PBH). Essa barreira desenvolve-se lateralmente, em subsuperfície (PBI e PBJ) até, posteriormente, emergir por completo. Este processo tende a não ocorrer em direção mais ao Norte do delta (PBL).

No perfil PBH (Figura 5), realizado à frente da barreira arenosa já emersa, percebe-se a inexistência de quaisquer feições submarinas. Os perfis PBI e PBJ foram realizados após a extremidade norte da barreira emersa que, à época do levantamento batimétrico, ainda não estava conectada ao continente. Nestes perfis aparece o prolongamento lateral da barreira em subsuperfície acompanhando o sentido da deriva. Especificamente no perfil PBJ, a barreira encontra-se muito próximo ao nível médio do mar, prestes a ficar emersa. No perfil PBL (Figura 5), último perfil realizado no extremo norte da área de estudo, já não se percebe mais nenhum tipo de feição submarina, registrando-se apenas o perfil da antepraia. Essas características mostram que neste ponto, o litoral não sofre mais influência do sistema de emersão de barreiras que se anexam ao continente, uma vez que elas são restritas às adjacências da desembocadura fluvial.

Além das análises que permitiram a caracterização morfológica da porção submarina, foi possível ainda produzir um mapa batimétrico do litoral norte com isolinhas a cada 0,5 m (Figura 6). Foi possível constatar a existência de um expressivo lóbulo deltaico submerso localizado a frente da desembocadura que se incorpora progressivamente ao litoral nos dois lados da foz, assim como descrito por Dias *et al.* (1984). Além da individualização do lóbulo deltaico, o mapa batimétrico permite também visualizar em planta a organização das barras submarinas. Observa-se que as barras se desenvolvem até a profundidade máxima de 3 m, profundidade esta suficiente para gerar arrebentação de ondas na frente deltaica, conforme pode ser observado na imagem de satélite (Figura 3).

Estas barras, identificadas nas linhas e no mapa batimétrico, correspondem ao primeiro estágio de evolução desenvolvido através de modelagem numérica por Dan *et al.* (2011), denominado de estágio de acumulação submarina, que pode levar um período de décadas para o seu desenvolvimento. Os autores relacionam essa acumulação a uma expressiva descarga fluvial, cujos sedimentos não conseguem ser transportados pelas ondas e correntes ao longo da costa, concentrando-se na frente deltaica e deixando a zona submarina com profundidades menores que o entorno. A diminuição da profundidade gera uma dissipação maior da energia das ondas, que passa a acumular cada vez mais sedimentos, como um mecanismo de retroalimentação.

4.3 Morfologia e dinâmica na porção emersa

A partir da união dos dados batimétricos de 2007 (perfis PBI, PBJ e PBL) aos dados topográficos realizados em 2008 (perfis PTI, PTJ e PTL) foi possível visualizar as alterações morfológicas e a emersão da barreira. A localização dos três perfis topográficos monitorados pode ser vista na figura 7.

Os perfis PBI e PBJ acoplados ao PTI e PTJ mostram que a barra submarina se encontrava a aproximadamente -2 m de profundidade no ano de 2007 e um ano após, ela já se mostrava emersa e isolando um corpo d'água, mais explicitamente conforme mostra o perfil PTI. De acordo com Dan *et al.* (2011), este processo corresponde ao segundo estágio do modelo desenvolvido pelos autores. Esse estágio é caracterizado pela emersão de uma barreira arenosa, cuja escala temporal de ocorrência foi definida em até poucos anos, de acordo com a modelagem numérica utilizada. A dinâmica visualizada na área de estudo corrobora a descrição do estágio previsto no modelo. O perfil PTL/PBL praticamente não sofreu alterações em sua morfologia submersa no período entre os dois levantamentos, mostrando mais uma vez que neste ponto não há mais influência das barras submarinas como acontece em direção ao Sul.

Após a emersão da barreira, esta passa a evoluir como um *spit*, isto é, quando a barreira possui apenas uma das extremidades conectadas ao continente. Esta feição passa a sofrer um desenvolvimento lateral a partir do transporte de deriva litorânea que, neste caso, ocorre em direção ao Norte. A partir da análise das imagens de 2000, 2004, 2007 e 2008 também foi possível quantificar o crescimento longitudinal da barreira emersa ao longo deste período, como pode ser visto na figura 8.

No período entre os anos de 2004 e 2007 foi registrado um grande desenvolvimento longitudinal da barreira. Em um período de três anos a feição cresceu cerca de 1.900 m com uma taxa de crescimento em torno de 630 m/ano. Da mesma forma, o crescimento registrado do ano de 2007 para 2008 até sua incorporação ao continente mostrou-se igualmente expressivo atingindo uma taxa de 730 m/ano. Este processo corresponde ao terceiro estágio do modelo proposto por Dan *et al.* (2011), cuja modelagem da variável temporal chegou a escala de século, sendo considerada o mais longo dentre os demais estágios. Este aspecto foi ainda corroborado

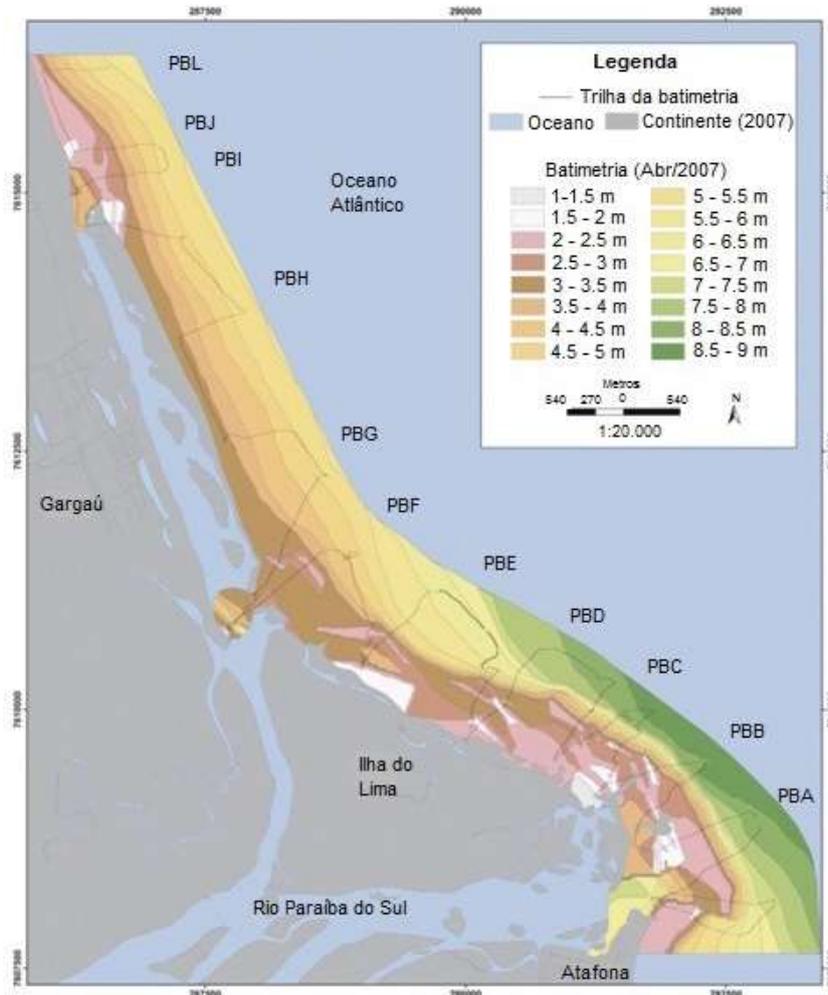


Figura 6 - Mapa batimétrico na forma de MDT nas proximidades da foz. Notar a presença das barras submarinas evidentes na coloração cinza e rosa, correspondentes às batimétricas entre 1,5 e 3,0 m.

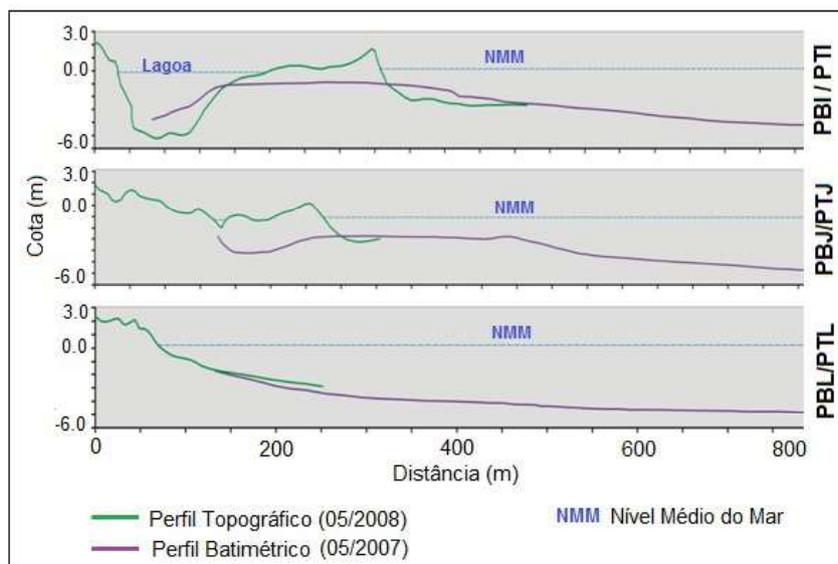


Figura 7 - Superposição dos perfis batimétricos e topográficos nos anos de 2007 e 2008, respectivamente. Nos dois primeiros perfis é possível notar que a barreira ainda estava submersa em 2007, possibilitando a navegação para o levantamento batimétrico até a posição onde, um ano depois (2008), já estaria a barreira emersa e a laguna formada.

pelo mapeamento de Giosan *et al.* (1999), que mapeou taxas de migração lateral entre 500 m/ano e 70 m/ano durante cerca de um século, em um *spit* desenvolvido no delta do rio Danúbio. Contudo, a escala temporal identificada por estes autores não foi observada no presente mapeamento que, neste caso, chegou a pouco menos que uma década.

Ao todo, de 2000 até 2008, a barreira arenosa ampliou seu comprimento em cerca de 2.630 m. Esse elevado crescimento longitudinal é decorrência de um conjunto de condições como a incidência oblíqua de ondas, o suprimento abundante de sedimentos e altas taxas de transporte longitudinal (KOMAR, 1973; DAVIS Jr. e FITZGERALD, 2004; DAN *et al.*, 2011).

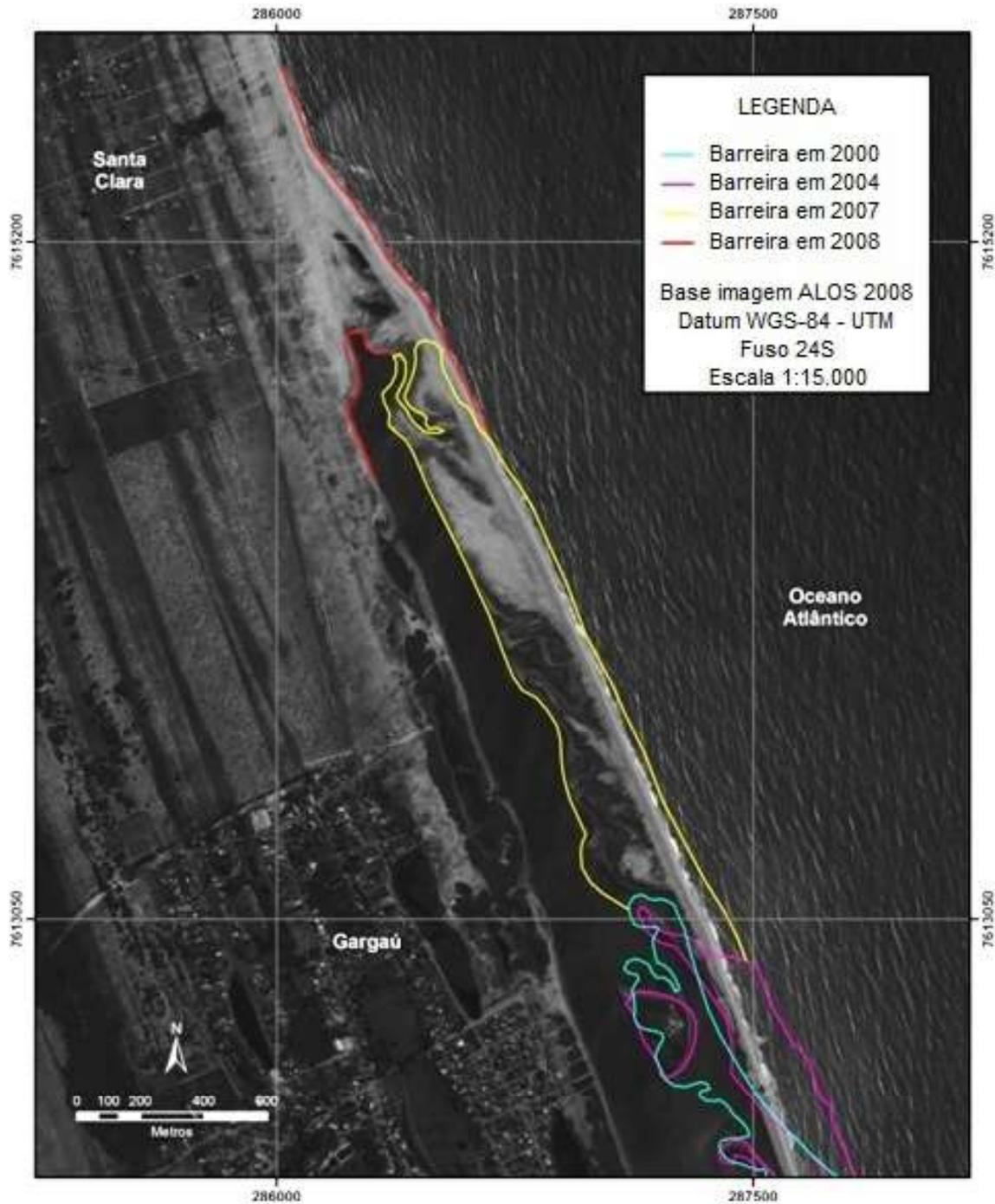


Figura 8 - Posição da barreira arenosa emersa ao longo dos anos de 2000, 2004, 2007 e 2008 onde é possível observar seu crescimento longitudinal até a conexão ao continente, isolando uma laguna.

Após o spit se conectar ao continente, ele passa a ter a configuração de um sistema barreira-laguna, conforme pode ser identificado no perfil PTI (Figura 9). A altura da barreira é significativamente baixa, o que faz com que os processos de transposição por ação das ondas (*overwash*) promovam um efeito de retrogradação nos perfis PTI e PTJ, da ordem de 80 m e 40 m respectivamente nos últimos sete anos (Figura 10). Rodriguez *et al.* (2000) e Van Maren (2005) citam o efeito de transposição como um dos princi-

pais processos que passam a influenciar a evolução destes tipos de barreiras costeiras. No caso da área de estudo, a característica refletiva da morfodinâmica da praia, observada na face litorânea da barreira após sua emergência, também contribui para que as ondas facilmente ultrapassem o topo da barreira, uma vez que a praticamente ausência da zona de surfe não permite que as ondas venham gradualmente dissipando energia, fazendo com que passem a arrebentar com muita intensidade diretamente na face praial.

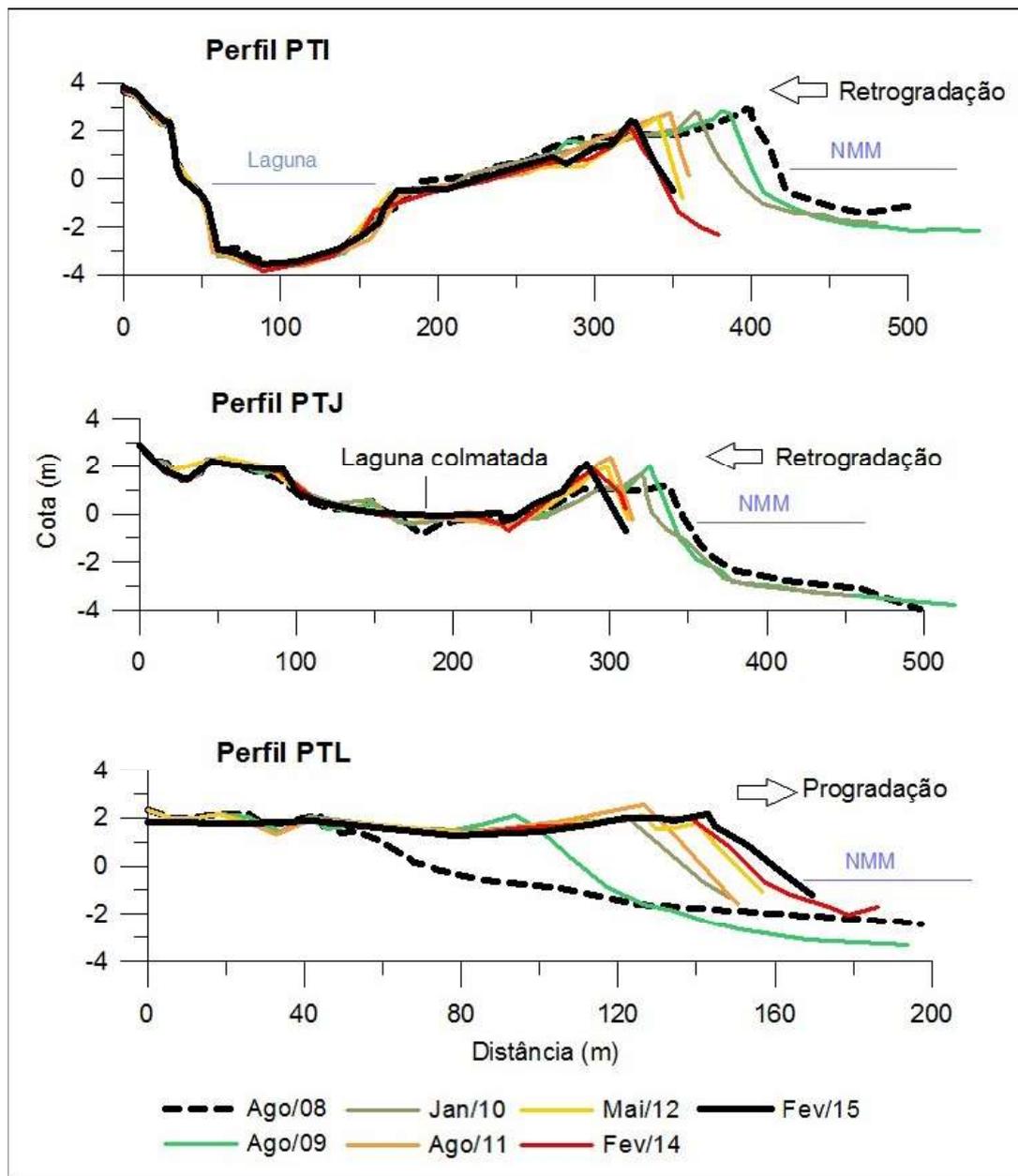


Figura 9 - Monitoramento dos perfis PTI, PTJ e PTL transversais à costa, entre os anos de 2008 e 2015. Nos dois primeiros é possível notar a retrogradação da praia pelo mecanismo de *overwash*, na área de influência da emergência das barras submarinas. Apesar da retrogradação, a resultante é de avanço da linha de costa devido à sucessiva incorporação das barras ao continente. No perfil PTL, a praia tem apresentado expressiva progradação em decorrência da convergência de transporte sedimentar, o que também tem resultado em avanço da linha de costa.

Especificamente no perfil PTJ, é possível também visualizar que a porção terminal da laguna já foi completamente colmatada. Nesse sentido, cabe destacar que as lagoas são extremamente efêmeras e à medida que a barreira segue retrogradando, elas evoluem sendo progressivamente colmatadas por sedimentação fina até se tornarem largas depressões formadas por sedimentos lamosos. Por sua vez, a barreira torna-se uma nova crista de praia incorporada à planície, conforme identificada pelos alinhamentos observados no mapa geomorfológico (Figura 1). Este processo corresponde parcialmente ao estágio final do modelo de Dan *et al.* (2011), uma vez que os autores prevêem o preenchimento da lagoa, mas não a contínua retrogradação da barreira em direção ao continente, promovida por efeitos de transposição pela ação das ondas.

Já o perfil PTL, ao contrário, apresentou uma progradação de aproximadamente 100 m nos últimos sete anos, resultando em uma taxa aproximada de 14 m/ano. Assim como mostrou o perfil batimétrico PBL, essa área já não sofre a influência das barras submarinas e da emersão da barreira. Além disso, conforme identificado na figura 4, próximo a este ponto ocorre uma conver-

gência de derivas litorâneas, o que poderia explicar o processo de progradação acentuado nesta região.

É importante destacar que apesar do comportamento retrogradante e da configuração morfológica do sistema barreira-laguna observados nos perfis PTI e PTJ (Figura 9), esta paisagem não pode ser associada a um sistema transgressivo, conforme destacaram Bhattacharya e Giosan (2003). Na verdade, a sucessiva incorporação dessas barreiras tende a provocar a resultante de avanço da linha de costa, conforme já havia relatado Lamego (1945) no caso de Gargaú. Logo, permanece a característica de um sistema regressivo, mas com uma morfologia diferenciada pela presença intercalada de barreiras costeiras (cristas de praia) e de depressões preenchidas com sedimentos finos de antigas lagunas colmatadas.

Considerando que o principal elemento morfológico da planície deltaica do rio Paraíba do Sul são as cristas de praia, esse trabalho permite também uma breve discussão a cerca da sua gênese. As cristas de praia possuem origem essencialmente marinha (OTVOS, 2000; HESP *et al.*, 2005; TAMURA, 2012) e sua gênese normalmente é atribuída a três principais mecanismos. O mais comum trata-se da incorporação de bermas (KO-



Figura 10 - Processo de transposição (*overwash*) por ação das ondas, fotografado em setembro de 2010, na barreira emersa (vista para o sul). Coordenadas: 21°34'26.98"S e 41°03'19.35"O.

MAR, 1976); o segundo, da gênese relacionada a ondas de tempestade (PSUTY, 1965); e o terceiro, associado à emersão de barras submarinas e desenvolvimento de *spits* (HINE, 1979). No caso do presente trabalho, os dados mostram que a borda norte do delta possivelmente sofre a influência de pelo menos dois mecanismos espacialmente delimitados. Da foz até a proximidade do perfil PTJ, a gênese está associada ao modelo de Hine (1979), considerado menos comum. E já a partir do perfil PTL em direção ao norte, provavelmente a gênese passa a ser a incorporação de bermas, semelhante ao processo observado na margem sul do delta.

4.4 Modelo morfológico do desenvolvimento de *spits* e sistema barreira-laguna na borda norte do delta do rio Paraíba do Sul e contextualização com os deltas assimétricos dominados por ondas.

Baseado nas hipóteses esquematicamente contidas na literatura e confirmadas a partir dos registros em campo propõe-se um modelo morfológico para o desenvolvimento e evolução dos *spits* e sistema barreira-laguna, para a borda norte do delta do rio Paraíba do Sul, conforme os seguintes estágios (Figura 11):

1. Os sedimentos arenosos de origem fluvial são depositados na frente deltaica;
2. Os sedimentos arenosos passam a ser transportados e retrabalhados pela ação das ondas formando barras submarinas;
3. A ação das ondas e da corrente de deriva litorânea gradualmente auto-organiza as barras em uma única barreira que passa a se desenvolver lateralmente em direção ao Norte;
4. Devido ao grande aporte de sedimentos, a barreira tende a se desenvolver verticalmente até sua emergência e passa a se comportar como *spit*, isolando corpos lagunares. Esse *spit* pode eventualmente ser rompido por eventos de alta energia e passar a se comportar como ilha-barreira.
5. Depois de emersa, os processos de deriva litorânea contribuem para o desenvolvimento lateral da feição, associado à ação da deriva litorânea.
6. A barreira tende a se conectar ao litoral e passa a retrogradar por processos de transposição (*overwash*), devido a sua altura muito baixa e as características refletivas da praia. Este processo contínuo tende a preencher e colmatar os corpos lagunares;
7. Este processo é espacialmente limitado às proximidades da desembocadura e temporalmente cíclico, não mais ocorrendo em direção ao Norte.

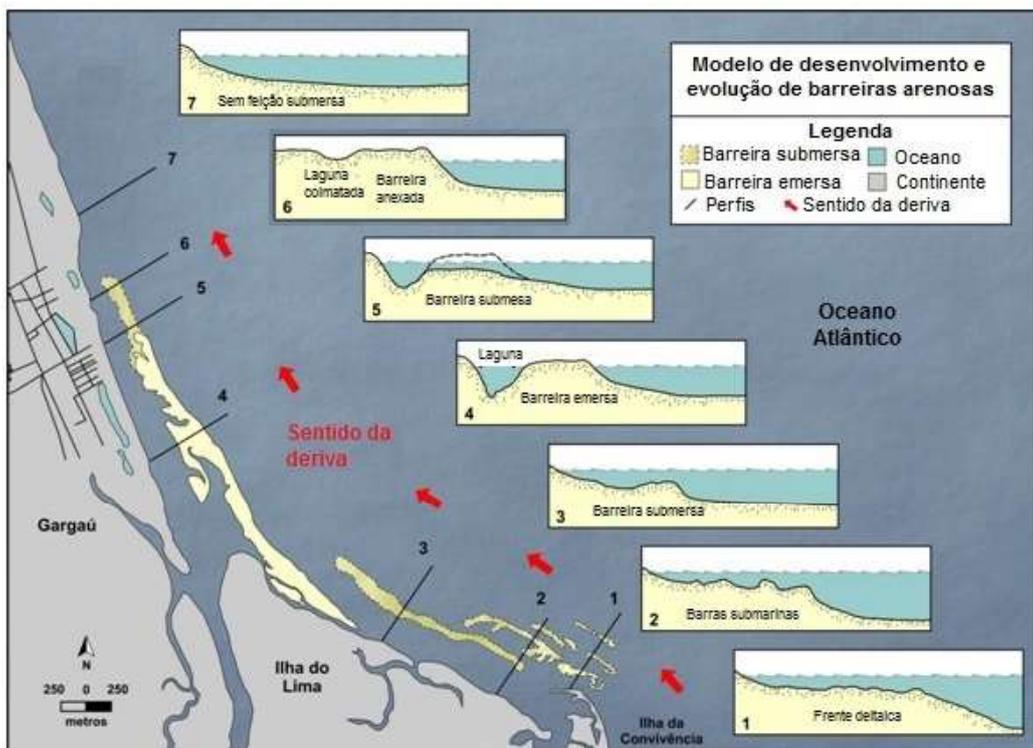


Figura 11 - Modelo de desenvolvimento e evolução de barreiras costeiras no flanco norte do delta do rio Paraíba do Sul, próximo à foz.

Com o modelo desenvolvido por Galloway (1975), durante algum tempo as ondas foram consideradas como forçante exclusiva nos deltas caracterizados como dominados por ondas. Nesse sentido, é incontestável a contribuição de Dominguez (1996) e Bhattacharya e Giosan (2003) à cerca da influência do papel da deriva litorânea, do efeito do “molhe hidráulico” e das variações relativas do nível do mar, como elementos também intrínsecos à evolução dos deltas, principalmente no que se refere à sua assimetria e as feições secundárias como *spits* e lagunas.

Contudo, mais recentemente, com o avanço das modelagens numéricas envolvendo a propagação de ondas, esta forçante tem voltado ao cenário como variável de primeira ordem no que se refere à evolução dos deltas. No trabalho pioneiro de Ashton e Murray (2005) e, posteriormente, Ashton e Giosan (2011), os autores afirmam que o ângulo em que as ondas se aproximam do delta é o elemento principal na influência da morfologia assimétrica em planta e da arquitetura sedimentar.

Segundo Ashton e Murray (2005), quando predominar um clima de ondas simétrico e com pequeno ângulo em relação à linha de costa (ondas difusivas), não haverá transporte residual de sedimentos e a evolução do delta ocorrerá de forma simétrica. No entanto, quando houver assimetria do clima de ondas, aumentará a tendência de aproximação de ondas de grande obliquidade em relação à feição deltaica (ondas antidifusivas), originando a assimetria entre os flancos do delta e o desenvolvimento de feições de instabilidade como as barras submarinas, *spits* e as lagunas em uma de suas margens. Esta hipótese tem sido considerada em trabalhos mais recentes como em Giosan (2007), Dan *et al.* (2011) e Anthony (2015).

5. Considerações finais

O presente trabalho contribuiu para o mapeamento em escala de detalhe de aspectos relacionados à gênese, à evolução e à morfodinâmica das barreiras arenosas no flanco norte do delta, corroborando ainda a sucessão de estágios desenvolvidos por Dan *et al.* (2011), apesar de algumas divergências em torno da abrangência temporal de alguns processos. Foi possível também verificar a relação entre os dados de sentido de deriva litorânea com o desenvolvimento da barreira arenosa. Ainda assim, restam lacunas a ser investigadas como a arquitetura deposicional das respectivas feições e também infor-

mações de ordem geocronológica. Espera-se, em breve, que idades obtidas por Luminescência Óptica Estimulada possam ajudar a calcular a ordem temporal de todo o processo envolvendo a progradação do sistema deltaico e como isso deverá ser interpretado na escala de evolução quaternária, considerando a sucessão de feixes de cristas de praias formadas na planície costeira.

Apesar das forçantes de ondas e das correntes de deriva litorânea serem consideradas as principais indutoras na formação das feições de *spits* e barreira-laguna em deltas, a influência fluvial tem sido cada vez mais investigada na evolução a curto e médio prazo das respectivas feições, considerando as variações de aporte sedimentar no sistema deltaico. Desta forma, considera-se que secas prolongadas e intervenções antrópicas, como construção de barragens, podem alterar a evolução e dinâmica dos *spits*, podendo retardar o seu ciclo. O contrário pode também ser esperado, num cenário de desmatamento acelerado na bacia e consequente produção de sedimentos (RODRIGUEZ *et al.* 2000)

No caso do rio Paraíba do Sul, este passou a sofrer inúmeras obras hidráulicas a partir de 1920, como barragens, obras de proteção contra enchentes, auxílio à navegação, retificação de meandros, irrigação, abastecimento e dragagem (COSTA, 1994). Associada a essas intervenções, a série histórica de vazão líquida entre os anos de 1934 a 2006 indicou uma redução média de 34%, considerando dados obtidos próximos à foz, de acordo com Rocha (2009). Por outro lado, Martin *et al.* (1985) já chamavam atenção para o incremento no volume de sedimentos arenosos produzidos a partir do desmatamento na área da respectiva bacia.

Nesse sentido, as contínuas alterações ambientais no rio Paraíba do Sul possivelmente podem alterar a dinâmica da evolução das barreiras arenosas e/ou dificultar modelagens numéricas que visem à compreensão e formulação de cenários associados à evolução da paisagem, não devendo, de forma alguma, ser negligenciadas. Portanto, torna-se urgente a integração de trabalhos desenvolvidos na bacia do rio Paraíba do Sul com enfoque hidro-sedimentológico aos trabalhos desenvolvidos no domínio deltaico.

Referências Bibliográficas

ANTHONY, E. J. Wave influence in the construction, shaping and destruction of river deltas: A review. **Marine Geology**, 361, p. 53–78, 2015.

- ASHTON, A. D. e GIOSAN, L. Wave-angle control of delta evolution. *Geophysical Research Letters* 38, L13404, p. 1-6, 2011.
- ASHTON, A. e MURRAY, A. B. Delta simulations using a one-line model coupled with overwash. *Proceedings of Coastal Dynamics*. ASCE. 2005.
- BASTOS, A.C. **Análise morfodinâmica e caracterização dos processos erosivos ao longo do litoral norte fluminense, entre Cabiúnas e Atafona**. 1997. 133p. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geofísica Marinha), Instituto de Geociências, Universidade Federal Fluminense, Niterói.
- BHATTACHARYA, J. P. e GIOSAN, L. Wave-influenced deltas: geomorphological implications for facies reconstruction. *Sedimentology*, 50, p.187–210, 2003.
- CARVALHO, N. V. de *et al.* O Clima de Ventos na Bacia de Campos. In: XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 1997. *Proceedings do XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. p. 413-422.
- CASSAR, J. C. M. e C. F. NEVES. Aplicação das rosas de transporte litorâneo à costa norte fluminense. **Revista Brasileira de Engenharia, Caderno de Recursos Hídricos**. Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH, São Paulo, SP, v. 11, p. 81-106, 1993.
- COSTA, G. **Caracterização histórica, geomorfológica e hidráulica do estuário do rio Paraíba do Sul**. 1994. 107 p. Dissertação (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro (RJ).
- DAN, S.; WALSTRA, D.J.R.; STIVE, M.J.F.; PANIN, N., Processes controlling the development of a river mouth spit. **Marine Geology**, 280, p. 116–129, 2011.
- DAVIS Jr., A. R. e FITZGERALD, D. M. **Beaches and Coasts**. Blackwell Publishing. Pp. 115-166. 2004.
- DIAS, G.T.M. O complexo deltaico do Rio Paraíba do Sul. In: **IV Simpósio do Quaternário**. Publicação Especial n.2 (CTCQ/SBG). p 58-88. 1981.
- DIAS, G. T. M.; GORINI, M. A. Morfologia e Dinâmica de evolução do Delta Atual do Rio Paraíba do Sul. In: V Semana de Geologia – CEGEO, 1979, Rio de Janeiro. *Anais da V Semana de Geologia*. Rio de Janeiro: Instituto de Geociências/ UFRJ, 1979.
- DIAS, G. T. M. e GORINI, M. A. A Baixada Campista: Estudo Morfológico dos Ambientes Litorâneos. In: **Anais do XXVI Congresso Brasileiro de Geologia**, Camboriú (SC), vol 1, p. 588-602, 1980.
- DIAS, G. T. M.; SILVA, C. G.; MALSCHITZKY, I. H.; PIERMES, C. A frente deltáica do rio Paraíba do Sul – fisiografia submarina e distribuição sedimentar. In: **Anais do XXXIII Congresso Brasileiro de Geologia**, Rio de Janeiro (RJ); Vol. IV, p. 1565-1576, 1984.
- DILLENBURG, S.; HESP, P. **Geology and Geomorphology of Holocene Coastal Barriers**. Heidelberg: Springer Verlag, v. 107, 2009, 380p.
- DOMINGUEZ, J. M. L., 1996. The São Francisco strandplain: a paradigm for wave-dominated deltas? In: DE BAPTIST, M. e JACOBS, P. (Eds.), **Geology of Siliciclastic Shelf Seas. Geological**. Society of London, Special Publication 117, p. 217–231.
- DOMINGUEZ, J. M. L.; BITTENCOURT, A. C. S. P.; MARTIN, L. Esquema evolutivo da sedimentação quaternária nas feições deltaicas dos rios São Francisco (Se\Al), Jequitinhonha (BA), Doce (ES), e Paraíba do Sul (RJ). **Revista Brasileira de Geociências**, 11(4), p. 227-237, 1981.
- FERNANDEZ, G. B. e ROCHA, T. B. Barreiras costeiras holocênicas: geomorfologia e arquitetura deposicional no litoral do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.16, n.2, p.301-319, 2015
- GALLOWAY, W. E. Process framework for describing the morphologic and stratigraphic evolution of delta depositional systems. In: BROUSSARD, M. L (Ed.), **Deltas: Models for Exploration**. Houston Geological Society, Houston, p. 87–98, 1975.
- GIOSAN, L. Morphodynamic feedbacks on deltaic coasts: lessons from the wave dominated Danube delta. **Coastal Sediments**, p. 828–841. 2007.
- GIOSAN, L.; BOKUNIEWICZ, H.; PANIN, N.; POSTOLACHE, I. Longshore Sediment Transport Pattern along the Romanian Danube Delta Coast. **Journal of Coastal Research**, 15 (4), p. 859–871, 1999.
- HESP, P. A.; DILLENBURG, S. R.; BARBOZA, E. G.; TOMAZELLI, L. J.; AYUP-ZOUAIN, R. N.; ESTEVES, L. S.; GRUBER, N. S.; TOLDO Jr, E. E.; TABAJARA, L. L. C.; CLEROT, L. C. P. Beach ridges, foredunes or transgressive dunefields? Definitions and an examination of the Torres to Tramandaí barrier system, Southern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 77 (3), p.493-508, 2005.
- HINE, A. C. Mechanism of development and resulting beach growth along a barrier spit complex. **Sedimentology**, 26, p. 333–352, 1979.
- KOMAR, P. D. Computer models of delta growth due to sediment

- input from Rivers and longshore transport. **Geological Society of America Bulletin**, 84, p. 2217–2226, 1973.
- KOMAR, P. D. **Beach Processes and Sedimentation**, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1976, 429 p.
- LAMEGO, A. R. **O homem e o brejo**. Serviço Gráfico do IBGE, Rio de Janeiro (RJ). 1945, 296 p.
- MACHADO, K. M. **Dinâmica Sedimentar na Planície do Paraíba do Sul – RJ**. 2009. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geofísica Marinha). Instituto de Geociências, Universidade Federal Fluminense, Niterói (RJ).
- MARTIN, L.; SUGUIO, K.; FLEXOR, J. M.; DOMINGUEZ J. M. L.; AZEVEDO, A. E. G. Evolução da planície costeira do Rio Paraíba do Sul (RJ) durante o Quaternário: influência das flutuações do nível do mar. *In: Anais do XXXIII Cong. Bras. de Geologia, Rio de Janeiro* (RJ), Vol.1, p.84-97. 1984.
- MARTIN, L.; SUGUIO, K.; FLEXOR, J.M.; TESSLER, M.; EICHLER, B.B. Roundness in Holocene sands of the Paraíba do Sul coastal plain, Rio de Janeiro, Brazil. **Journal of Coastal Research** 1(4), p. 343–351, 1985.
- MUEHE, D.; ROSO, R. H.; SAVI, D. C. Avaliação do Nível do Mar como Datum Vertical para Amarração de Perfis de Praia. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Ano 4, N.1, p 53-57, 2003.
- MURILLO, V. C.; SILVA, C. G.; FERNANDEZ, G. B. Nearshore sediment sand coastal evolution of Paraíba do Sul river delta, Rio de Janeiro, Brazil. **Journal of Coastal Research**, Special Issue 56, p. 650–654, 2009.
- NANSON, R. A.; VAKARELOV, B. K.; AINSWORTH, R. B.; WILLIAMS, F. M.; PRICE, D. M. Evolution of a Holocene, mixed-process, forced regressive shoreline: The Mitchell River delta, Queensland, Australia. **Marine Geology**, 339, p. 22–43, 2013.
- ORTON, G. J. e READING, H. G. Variability of deltaic processes in terms of sediment supply, with particular emphasis on grain size. **Sedimentology**, 40, p. 475–512, 1993.
- OTVOS, E. G. Beach ridges – definitions and significance. **Geomorphology**, 32, p.83-108, 2000.
- OTVOS, E. G. Coastal barriers – Nomenclature, processes and classification issues. **Geomorphology**, n.139-140, p.39-52, 2012.
- PINHO, U. F. **Caracterização do estado do mar na Baía de Campos**. 2003. 145 p. Dissertação (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro (RJ).
- PSUTY, N. P. Beach-ridge development in Tabasco, México. **Annals Association of American Geographers**, n. 55, p.112-124, 1965.
- RODRIGUEZ, A. B.; HAMILTON, M. D.; ANDERSON, J. B. Facies and evolution of the modern Brazos Delta, Texas; wave versus flood influence. **Journal of Sedimentary Research**, 70, p. 283–295, 2000.
- ROCHA, T. B. **Morfodinâmica costeira e gestão de orla marítima em costa sob influência fluvial: Borda meridional do atual delta do Rio Paraíba do Sul (RJ)**. 2009. 145p. Dissertação (Mestrado em Geografia) Instituto Geociências, Universidade Federal Fluminense, Niterói (RJ).
- ROY, P. S.; COWELL, P. J.; FERLAND, M. A.; THOM, B. G. Wave-dominated coasts. *In: CARTER, R. W. G.; WOODROFFE, C. D. (Eds.). Coastal evolution: late quaternary shoreline morphodynamics*. Cambridge University Press, p.121-186, 1994.
- SILVA, C. G. **Estudo da evolução geológica e geomorfológica da região da Lagoa Feia, RJ**. 1987. 116p. Dissertação (Mestrado em Geologia). Instituto Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- SOUZA, M. H. S. Clima de ondas ao norte do estado do Rio de Janeiro. 1988. 181p. Dissertação (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro (RJ)
- SUTER, J. R. Deltaic coasts. *In: CARTER, R.W.G; C. D. WOODROFFE (Eds). Coastal evolution: late quaternary shoreline morphodynamics*. Cambridge University Press p. 87–120, 1994.
- TAMURA, T. Beach ridges and prograded beach deposits as palaeo environment records. **Earth-Science Reviews**, 114, p. 279-297, 2012.
- USACE. **Coastal Engineering Manual**, Engineer Manual 1110-2-1100, U.S. Army Corps of Engineers. Washington, D.C. 2002
- VAN MAREN, D. S. Barrier formation on an actively prograding delta system: the Red River Delta, Vietnam. **Marine Geology** 224, p.123–143, 2005.
- VASCONCELOS, S. C. **Evolução Morfológica das Barreiras Arenosas ao Norte da Desembocadura do Rio Paraíba do Sul, RJ**. 2010. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geofísica Marinha). Instituto de Geociências, Universidade Federal Fluminense, Niterói (RJ).
- VESPREMEANU-STROE, A. e PREOTEASA, L. Morphology and the cyclic evolution of Danube delta spits. *In: RANDAZZO, G.; JACKSON, D. W. T.; COOPER, J. A. G. (Eds.). Sand and Gravel Spits*. Coastal Research Library Series. Springer, 2015.