

Considerações sobre a Dinâmica Sedimentar Governada por Ondas na Evolução do Delta do Rio Paraíba do Sul, Litoral Norte do Estado do Rio de Janeiro

Karoline Machado

Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geofísica Marinha. E-mail :
karollynemachado@gmail.com

Albano Alves Ribeiro

Diretoria de Hidrografia e Navegação. E-mail: albanoribeiro@terra.com.br

Guilherme Borges Fernandez

Departamento de Geografia, Universidade Federal Fluminense. Programa de Pós Graduação em Geologia e Geofísica Marinha. E-mail : guilherme@igeo.uff.br

Resumo. O delta do Rio Paraíba do Sul é uma das áreas mais estudadas no litoral brasileiro. Chama a atenção que apesar de ser um delta dominado por ondas nenhum dos trabalhos registram modelos evolutivos com ondas. Os resultados aqui obtidos sugerem que foi possível se verificar a forma atual do delta em função das ondas utilizando modelos matemáticos.

Palavras chave : delta; modelagem numerica; ondas

Abstract. The Paraíba do Sul Delta represents one of the most studied deltas along the Brazilian Coast. Instead the most important factor that controls the evolution of this delta is the wave climate, previous works do not show a good interpretation using this element. In this paper we applied modelling waves to explain some aspects of the evolutionary history of Paraíba do Sul delta.

Key words : Delta ; wave modelling ; waves

1. Introdução

Os ambientes sedimentares observados ao longo da costa representam um dos mais dinâmicos encontrados na face da Terra. Tal dinâmica se deve essencialmente pela inter-relação de diversos fatores geológicos, oceanográficos e meteorológicos, responsáveis pela forma atual dos sistemas geomorfológicos distribuídos pelo litoral e sua constante variação espaço-temporal.

Ao longo das regiões costeiras, onde predominam ambientes deposicionais, normalmente há grande disponibilidade de sedimentos, principalmente quando associados às desembocaduras fluviais. Sob condições pretéritas de padrões de regressão marinha em áreas de domínio de micromaré e forte atuação de ventos e ondas, a evolução morfológica destes ambientes ocorre ainda mais rapidamente, notadamente devido a respostas de progradação e retrogradação em meso-escala espaço-temporal,

além de processos erosivos e deposicionais em menor escala de tempo e espaço. Fundamentalmente, em áreas com estas características, verifica-se que a evolução da paisagem ocorre sob condições de processos costeiros governados por ondas e, desse modo, estudos representativos da dinâmica sedimentar, sem que tais fatores sejam considerados adequadamente, podem acarretar erros grosseiros de interpretação.

Dessa forma, estudar ondas em áreas já ricamente descritas em termos geológicos pode vir a contribuir decisivamente para o conhecimento da morfodinâmica costeira e da alteração na configuração da linha de costa, mesmo em regiões deltaicas onde o principal agente modificador seria o fluxo fluvial. Assim se configura o principal objetivo deste trabalho, que é apresentar os principais aspectos da contribuição da dinâmica sedimentar imposta pelas ondas no delta do Rio Paraíba do Sul, localizado no litoral norte do Estado do Rio de Janeiro.

2. Área de Estudo

A desembocadura do Rio Paraíba do Sul apresenta características morfológicas bastante peculiares, onde predominam sistemas de barreiras regressivas ou cristas de praia ajustadas de forma assimétrica nos dois flancos a partir da desembocadura fluvial. A assimetria pode ser definida pelas características fisiográficas da disposição das barreiras. No flanco sul predominam feições mais baixas e com distâncias menores entre as cristas e depressões, suavemente capeadas por sedimentos eólicos, conforme mostra a Figura 1. Já as barreiras formadas no lado setentrional, são mais altas e com depressões alongadas formadas por sistemas lagunares aprisionados pela emersão de barras. Apesar de algumas considerações discordantes em relação à evolução geológica da área, em todos os trabalhos é consenso que o atual sistema de barreiras regressivas associadas à desembocadura do Rio Paraíba do Sul foi formado numa situação de tendência de descida do nível médio relativo do mar, formando um ambiente progradante da linha de costa nos últimos 5000 anos conforme os trabalhos de Dias e Gorini,(1980); Dias e Gorini (1981); Dominguez *et al.* (1981); Martin *et al.*, (1984 a e b); Silva (1987); Bastos (1997).



Figura 1. Delta do Rio Paraíba do Sul formado por feições regressivas associadas a ondas.

O modelo proposto por DOMINGUEZ *et al.* (1983) e MARTIN *et al.* (1984a) para processo de formação das cristas de praia sugere uma forte inter-relação entre a hidrodinâmica fluvial e a costeira. Os autores afirmam que a foz do rio atuaria como um molhe hidráulico, que, quando mais ativo, atuaria na retenção de sedimentos transportados por deriva litorânea com sentido sul-norte permitindo o crescimento da planície ao sul da foz. A observação de discordâncias no alinhamento das cristas estaria relacionada a ciclos de cheia e estiagem no regime fluvial, que também seriam responsáveis pela formação de diversos degraus na margem do rio, com tendência a progradação na direção nordeste. Desta forma, o processo erosivo atual verificado na foz seria um elemento que marcaria uma futura discordância no alinhamento de cristas, no contínuo processo progradante da planície.

Dias (1981) relaciona uma série de fatores para explicar os intensos processos erosivos recentes, tais como: mudanças na orientação do curso fluvial, diminuição do aporte de sedimentos na zona costeira adjacente e inversão do sentido da deriva

litorânea. Desta forma foram definidas sucessivas fases de progradação e erosão da foz através de um efêmero pontal arenoso que crias as condições morfológicas para diversas fases erosivas e deposicionais, que tiveram como resultante o recuo da linha de costa entre 1956 e 1979 de cerca de 100 m (Dias e Gorini, 1980; Dias, 1981).

Dias *et al.* (1984) apresentam um modelo que propõe a partir da sedimentação junto à foz a formação de bancos arenosos, que proporcionariam *shoaling* sobre as cristas de ondas, a partir de refração, funcionando de forma a inverter o sentido da deriva. Este fenômeno seria responsável pelo desenvolvimento assimétrico do delta. O modelo proposto pelos autores foi feito para ondas de NE, que teriam um caráter construtivo em relação ao efeito erosivo de ondas do quadrante sul. Porém, chama a atenção que nenhum dado referente a parâmetros de ondas além da incidência inferida seja mencionado.

3. Metodologia

O estudo da estabilidade da linha de costa parte da evolução morfológica associada à obliquidade de incidência das ondas. O conceito de que a formação de irregularidades no alinhamento do litoral está diretamente associada ao ângulo crítico de incidência das ondas, em relação à linha de costa, que promove um transporte litorâneo máximo. Nesse trabalho o valor crítico para que haja instabilidade da linha de costa foi assumido tomando a expressão apresentada por Komar (1971) que sugere que o ângulo máximo entre a crista das ondas e a linha de costa ocorre quando $\theta_0 - \theta = 42^\circ$.

De qualquer forma, independentemente do ângulo sugerido é mais realístico sugerir que quando o clima de ondas atinge a linha de costa com uma angulação superior à crítica, a linha de costa será instável, o que promoveria a evolução de formações sinuosas ao longo do litoral. Dessa forma, quando ondas cuja incidência fosse inferior ao valor crítico tais sinuosidades tenderiam a ser amenizadas, pois o litoral seria estável. Assim Ashton *et al.* (2001) assume que valores negativos de difusividade estariam condizentes com ângulos superiores ao crítico caracterizando instabilidade na linha de costa.

Para a comprovação dessas relações, o autor construiu um algoritmo computacional que demonstra tanto a origem como a evolução de feições rítmicas através de um modelo numérico, deduzindo ainda, uma nova equação de difusividade de

sedimentos para os parâmetros de onda em águas profundas. Desta extrai-se o coeficiente μ (equação 1) que representa a difusividade em função de H_0 – Altura da onda em águas profundas; T – Período das ondas; θ_0 – ângulo de incidência das ondas em águas profundas; θ – linha de costa

$$\mu = \left(\frac{1}{D} \right) K H_0^{1/5} T^{1/5} \cos^{1/5}(\theta_0 - \theta) [\cos^2(\theta_0 - \theta) - \frac{6}{5} \sin^2(\theta_0 - \theta)] \quad (1)$$

Através do somatório do produto de cada contribuição pelo intervalo de amostragem (1 h) dividido pelo tempo total, a difusividade residual ($\mu_{residual}$) foi determinada (Equação 2).

$$\mu_{residual} = \frac{\sum_i^n \mu_i \Delta t}{\sum_i^n \Delta t} \quad (2)$$

Os valores de difusividade residual obtidos pela Equação 2 podem ser negativos ou positivos indicando, respectivamente, linhas de costa instáveis, $\mu_{residual} < 0$, ou estáveis, $\mu_{residual} > 0$. No primeiro caso, quando a linha de costa for considerada instável, os resultados indicarão que existem condições para a evolução de perturbações na linha de costa. Enquanto que, no segundo caso, quando a linha de costa for estável, há a tendência de linearização da linha de costa.

Como estes valores refletem também a energia das ondas, a análise dos resultados torna-se mais simples se empregarmos um índice adimensional que varia entre -1 e 1. O menor valor indica que o clima de ondas é totalmente antidifusivo, e o maior, totalmente difusivo. Assim, esse índice de estabilidade (Γ) apresentado por Ashton e Murray (2006) assume a forma da Equação 3 abaixo:

$$\Gamma = \frac{\sum_i^n \mu_i \Delta t}{\sum_i^n |\mu_i| \Delta t} \quad (3)$$

Em relação aos parâmetros de onda, foram utilizadas as informações geradas pelo WAM (Wave Model). Este modelo é aplicado pelo Centro de Hidrografia da Marinha (CHM) na região do Atlântico Sul forçado por um campo de ventos a 10

metros de altura, gerado por outro modelo, o GME do Instituto de Meteorologia da Alemanha (DWD). Na presente pesquisa foi utilizada a série temporal de parâmetros de onda que abrange o período de janeiro de 2004 a dezembro de 2006 de uma bóia virtual na Bacia de Campos. Essa é constituída por valores horários de altura de onda (H_0), período de onda (T) e direção de onda (θ_0).

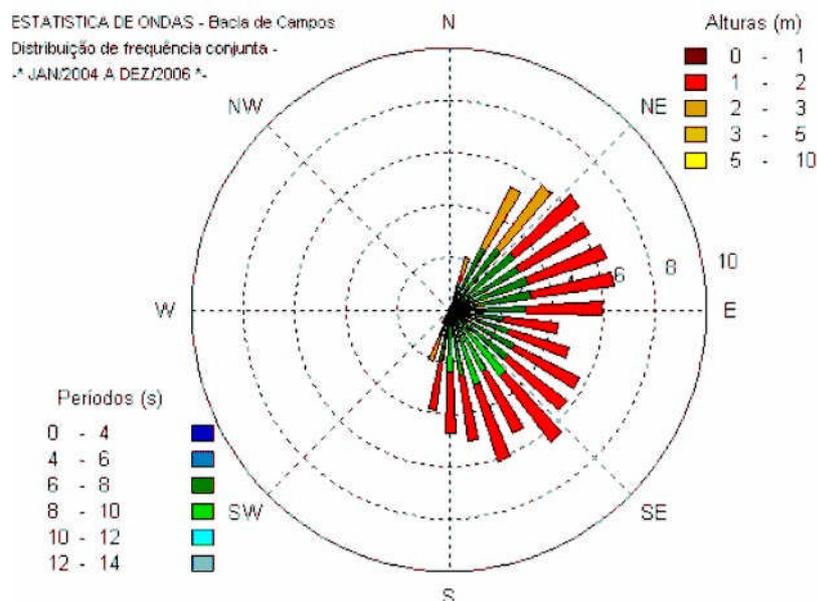


Figura 2. Estatísticas de ondas utilizadas para o Delta do Paraíba do Sul.

4. Resultados

Considerando o modelo de evolução deltaica desenvolvido por Ashton e Murray (2005), verifica-se que os trabalhos realizados para a evolução da planície foram baseados em aspectos observacionais, com pouca ou nenhuma consideração quantitativa sobre o papel desempenhado pelas ondas. Os dados avaliados ou foram reproduzidos a partir de informações relativas ao comportamento percentual de ventos locais ou pela forma das feições geomorfológicas. Assim, este trabalho visa contribuir para que, de maneira mais consistente, os aspectos geológicos já descritos pela literatura possam ser reavaliados a luz de um clima ondas refinado.

De acordo com o trabalho pioneiro de Ashton e Murray (2005), o ângulo de aproximação de ondas em água profunda pode afetar o desenvolvimento dos deltas. Segundo Ashton e Murray (2005), quando predominar um clima de ondas simétrico e

com pequeno ângulo em relação à normal da linha de costa (i.e. ondas difusivas), não haverá transporte residual de sedimentos e a evolução do delta será de acordo com o modelo clássico proposto por Komar (1973).

No entanto, quando houver assimetria do clima de ondas aumentará a tendência de aproximação de ondas de grande obliquidade em relação à feição deltáica (i.e. ondas antidifusivas), originando estruturas significativamente diferentes em cada flanco, como mostra a Figura 3. No flanco no qual as ondas difusivas forem predominantes haverá a formação de cordões litorâneos uniformes e paralelos entre si. O inverso ocorre no flanco com menor exposição às ondas difusivas, onde embaiamentos serão formados entre os cordões litorâneos. A figura 4 mostra destacadamente este padrão.

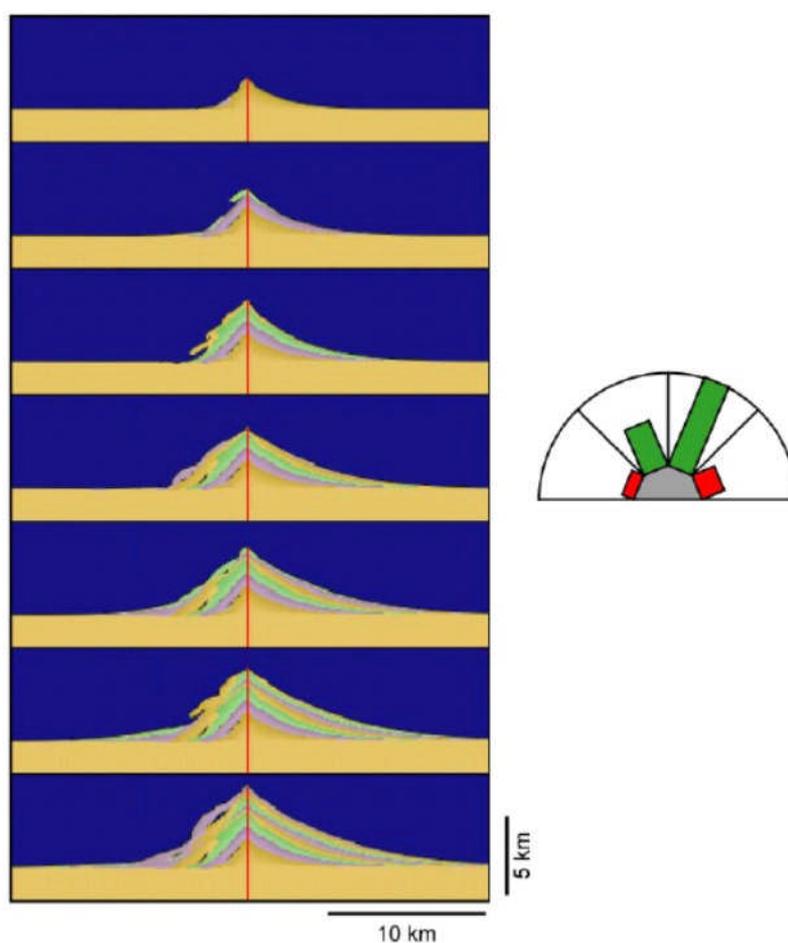


Figura 3. Resultado das simulações conduzidas por ASHTON & MURRAY (2005), para clima de ondas predominantemente difusivo e assimétrico.

O Delta do Paraíba do Sul (Fig. 5) apresenta características geomorfológicas bastante similares às previamente apresentadas, sendo sujeito a um clima de ondas assimétrico, predominantemente de quadrante sul. O flanco sul é composto por sólidos cordões litorâneos, enquanto que o flanco norte consiste de camadas intercaladas de cordões litorâneos e lamas, remanescentes do fechamento das regiões internas aos cordões, conforme as desenvolvidas no modelo (Fig. 5).

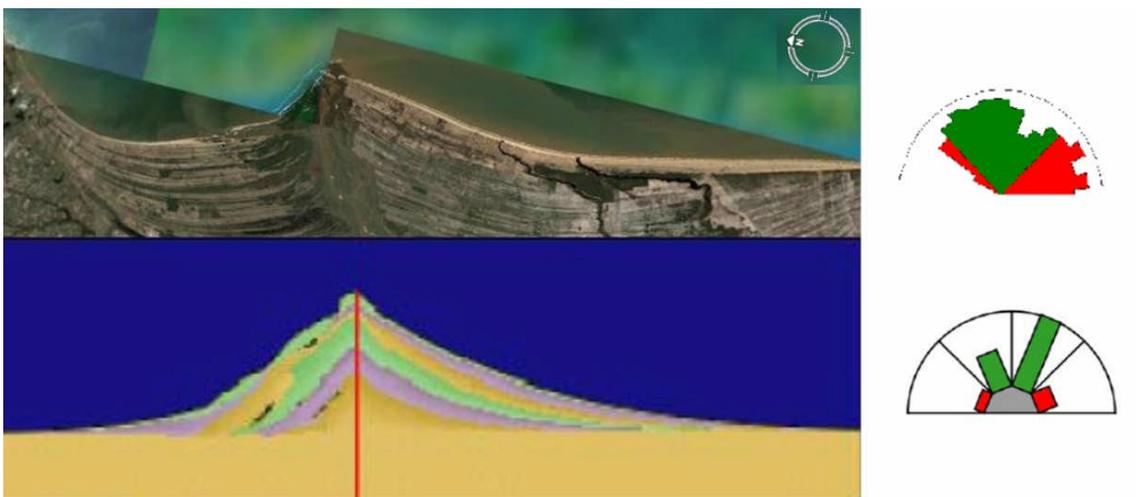


Figura 4. Comparação entre o delta do Paraíba do Sul (acima) e o resultado do modelo de Ashton & Murray (2005) para deltas desenvolvidos sob clima de ondas assimétrico (abaixo). Em ambos os casos há a formação de charcos a sotamar da direção predominante das ondas.

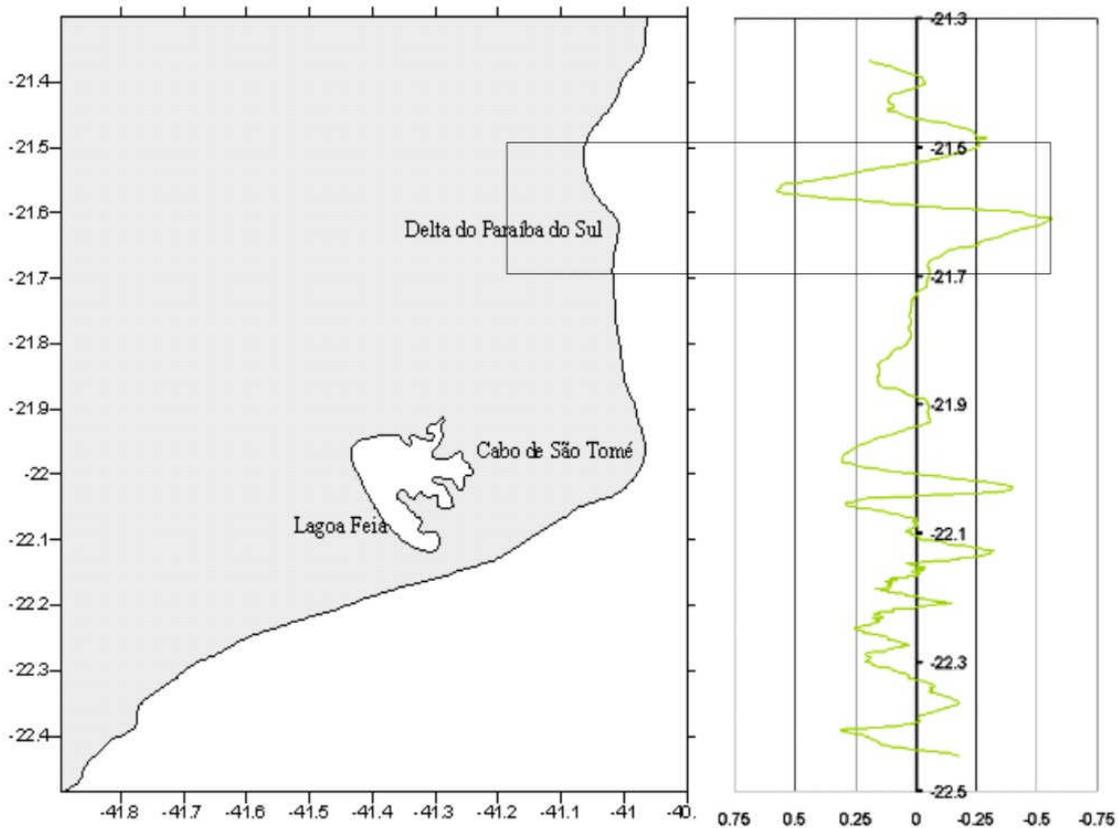


Figura 5. Resultado da difusividade ao longo de toda a planície com destaque para a atual foz mostrando a diferença de difusividade que mostra o comportamento morfológico acoplado ao clima de ondas modelado.

5. Conclusão

Apesar de serem feitas comparações entre o delta do Paraíba do Sul e os resultados das simulações de Ashton e Murray (2005), estas não foram ainda totalmente calibradas para reproduzir a evolução desse delta. Portanto, as escalas espaço-temporais do modelo ainda são muito menores do que a apresentada para a formação dessa planície. Porém, a proposta dessa comparação é apenas lançar luz a outros processos, como a difusividade do clima de ondas, que possam ter interferido na evolução desse delta e não apenas a variação sazonal de descarga sedimentar, como proposto por Martin *et al.* (1984a).

Bibliografia

Ashton, A., Murray, A. B. (2005). Delta simulations using a one-line model coupled with overwash. In: Coastal Dynamics, Barcelona. 2005.

Bastos, A.C. (1997) Análise morfodinâmica e caracterização dos processos erosivos ao longo do litoral norte fluminense, entre Cabiúnas e Atafona. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências. Universidade Federal Fluminense.

Dias, G. T. M.; Gorini, M. A. (1981) O complexo deltáico do rio Paraíba do Sul. In: IV Simpósio do Quaternário no Brasil. Publicação Especial. n. 2. p. 58-88.

Dias, G. T. M.; Gorini, M. A. (1980). A Baixada Campista: Estudo morfológico dos ambientes litorâneos. In: Anais do XXXI Congresso Brasileiro de Geologia, Camboriú. v. 1. n. 588-602..

Dias, G.T.M. *et al.* (1984) A planície deltaica do rio Paraíba do Sul – Sequências sedimentares subsuperficiais. In: Anais do XXXIII Congresso Brasileiro de Geologia, Rio de Janeiro. n. 1 p. 98-104.

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. v. 11. n. 4. p. 227-237. 1981.

Dominguez, J. M. L.; Bittencourt, A. C. S. P.; Martin, L. (1983) O papel da deriva litorânea de sedimentos arenosos na construção das planícies costeiras associadas as desembocaduras dos rios São Francisco (SE/ AL), Jequitinhonha (BA), Doce (ES) e Paraíba do Sul (RJ). Revista Brasileira de Geociências. v. 13. p. 98-115.

GOOGLE EARTH ©. Google Earth: Explore, Search and Discover. Disponível em: <<http://earth.google.com/>>. Acessado: 3 dez. 2007.

Komar, P. D. (1971) The mechanics of sand transport on beaches. Journal of Geophysical Research. v. 76, n. 3. p. 713-721. 1971.

Martin, L. *et al.* (1984^a).Evolução da planície costeira do rio Paraíba do Sul (RJ) durante o Quaternário: Influência das flutuações do nível do mar. In: Anais do XXXIII Congresso Brasileiro de Geologia. Rio de Janeiro. p. 84-97.

Martin, L. *et al.* (1984)Significado geológico das variações dos graus de arredondamento das areias holocênicas da planície costeira do rio Paraíba do Sul (RJ). Evolução da planície costeira do rio Paraíba do Sul (RJ) durante o Quaternário: Influência das flutuações do nível do mar. In: Anais do XXXIII Congresso Brasileiro de Geologia. Rio de Janeiro. p. 84-97.

Miranda, E. E. de; Coutinho, A. C. (Coord.). Brasil Visto do Espaço. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2004. Disponível em: <<http://www.cdbrasil.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 12 jun. 2007.

Silva, C. G. (1988) Complexo Deltaico do Rio Paraiba do Sul (Roteiro de Excursão Geológica). In: Anais do Primeiro Simpósio de Geologia do RJ-ES. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geologia - Núcleo RJ/ES., p. 299-346.