

RELATÓRIO TÉCNICO No. 01 / 2018

SOLICITANTE: DRA. ANA CAROLINA PALMA DE ARAÚJO. DEFENSORIA PÚBLICA DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. NÚCLEO DE PRIMEIRO ATENDIMENTO DA COMARCA DE SÃO JOÃO DA BARRA-RJ.

ÁREA: BAIXO CURSO DO RIO PARAÍBA DO SUL, NÚCLEO URBANO DE ATAFONA, MUNICÍPIO DE SÃO JOÃO DA BARRA - RJ.

ASSUNTO: EROÇÃO COSTEIRA E AVANÇO DO MAR NA LOCALIDADE DE ATAFONA. CAUSAS, CONSEQUÊNCIAS E PROPOSTAS DE INTERVENÇÃO.

AUTOR: PROF. DR. EDUARDO MANUEL ROSA BULHÕES. UNIDADE DE ESTUDOS COSTEIROS. DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA. INSTITUTO DE CIÊNCIAS DA SOCIEDADE E DESENVOLVIMENTO REGIONAL. UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE.

Campos dos Goytacazes, 10 de agosto de 2018

Ilustríssima Defensora,

Em resposta ao ofício no. 493/2018 da Defensoria Pública do Estado do Rio de Janeiro, Núcleo de Primeiro Atendimento da Comarca de São João da Barra-RJ, conforme prazo acordado, segue relatório sobre as questões concernentes à temática “Erosão Costeira / Avanço do Mar em Atafona”. O presente texto visa atender à seguinte pauta:

- I. Apontar possíveis causas e condicionantes para a questão, com enfoque especial para o “avanço do mar” (ou diminuição / recuo da costa) e seus impactos;
- II. Indicar, caso existam, possibilidades de solução / minimização dos impactos (especialmente humanos) trazidos pela questão, passando pelos caminhos institucionais, normativos e técnico-científicos para tanto, apontando, se possível, as possibilidades que sejam mais compatíveis com o meio ambiente;
- III. Dar exemplos bem-sucedidos, caso existam, no Brasil e no mundo, de obras realizadas para solução/minimização dos problemas decorrentes deste fenômeno;
- IV. Indicar se existe estimativa de custo das obras eventualmente apontadas como possibilidades de solução/ minimização dos impactos decorrentes deste fenômeno;
- V. prestar demais esclarecimentos que entender cabíveis.

Erosão Costeira em Atafona: Panorama, Causas e Consequências

A **erosão costeira** é uma alteração natural no meio físico que ocorre quando os mecanismos que promovem a retirada de sedimentos¹, neste caso areias, de determinado segmento do litoral (ex. uma praia qualquer) são mais eficientes do que os mecanismos que as suprem, durante um período de tempo determinado. Esse “saldo” entre areias que chegam e que saem de determinado segmento do litoral, durante um período de tempo determinado, é chamado de **balanço sedimentar** e o mesmo pode ser positivo, resultando em **acresção** (acumulação); neutro, resultando em estabilidade; ou **negativo, resultando em erosão**.

Em publicação recente na revista *Nature*, Luijendijk *et al* (2018)², em uma pesquisa com base em quase dois milhões de imagens de satélite entre 1984-2016, verificaram que 31% do litoral mundial é formado por praias arenosas. De acordo com os autores, considerando todas as praias do planeta, 48% se apresentam como estáveis, 28% crescem em direção ao mar (acresção) e **24% recuam persistentemente sob efeito da erosão costeira**, em taxas que excedem 0,5 metro por ano (m/ano). Nas áreas onde ocorre recuo da linha de praia em **taxas superiores a 5 m/ano a erosão costeira é considerada extrema** e representa cerca de **4% do conjunto global de praias arenosas**. Essa última, **erosão costeira extrema**, é a realidade do litoral junto à foz do rio Paraíba do Sul, em São João da Barra-RJ, na localidade denominada Atafona.

¹ Detrito rochoso ou biológico que é depositado na superfície do planeta em camadas de partículas soltas quando diminui a energia do fluido que o transporta (ex. água ou vento).

² LUIJENDIJK, A.; HAGENAARS, G.; RANASINGHE, R.; BAART, F.; DONCHYTS, G.; AARNINKHOF, S. The State of the World's Beaches. *Nature, Scientific Reports*, v. 8 (6641) 2018.



Figura 1. Captura de tela dos resultados do trabalho de Luijendijk *et al.* (2018) com foco para a área da foz do rio Paraíba do Sul, indicando em vermelho e laranja as **áreas sob erosão**, em amarelo as áreas estáveis e em tons de verde as áreas onde verifica-se acumulação junto à linha de costa (acresção). Fonte: <https://aqua-monitor.appspot.com/?datasets=shoreline>

As causas da erosão costeira podem ser de cunho **evolutivo** apontando uma tendência geológica ou geomorfológica relativamente lenta, de médio ou longo termo, de mudanças na forma do litoral, ou **episódico** onde impactos erosivos eventuais, pontuais e esporádicos, de curto termo, modificam os aspectos físicos da linha de costa. No primeiro caso a erosão pode estar associada a um ajuste erosivo em resposta à elevação relativa ou absoluta do nível do mar. Mudanças climáticas podem também levar à alterações no suprimento de sedimentos e na energia que é direcionada ao litoral. Eventos de tectonismo e vulcanismo podem modificar abruptamente a forma do litoral. Já no segundo caso usualmente a erosão ocorre em função de tempestades extremas e pouco frequentes em determinado segmento do litoral e sobretudo, pela **alteração que o homem promove na linha de costa** que pode aumentar a vulnerabilidade e diminuir a resiliência do meio físico. Nesse sentido, volta-se a citar Luijendijk *et al.* (2018) que apontam **dois fatores atribuídos à interferência humana nos processos erosivos na costa**, a saber: **mineração de areias e construção de estruturas costeiras**. No primeiro caso, os autores citam, como exemplo, um delta no Vietnã³ onde a **excessiva extração de areias da calha fluvial resultou em**

³ Mekong Delta

déficit de materiais para abastecer à costa, citam também que a excessiva extração da água de subsuperfície para o consumo promove acomodação do terreno, ao que denomina-se subsidência, o que faz com que o nível dos terrenos costeiros sejam rebaixados. Sobre a **construção de estruturas costeiras** os autores citam estruturas portuárias (ex. molhes e espigões) em áreas onde existe intenso transporte de sedimentos de rumo dominante e os **efeitos erosivos à sotamar⁴ das estruturas**. Esses impactos e seus variantes, tanto associados à construção de barragens e mineração de areias⁵ em rios e estuários, quanto aos associados à obras costeiras, são muito comuns no mundo inteiro e também no Brasil. Muehe (2005)⁶ adiciona que, no Brasil, **problemas de erosão costeira surgem devido à urbanização que avança sobre a praia** e imobiliza faixas ainda ativas da movimentação das mesmas.

Em Atafona, Argento (1989)⁷ relatou a destruição de um farol que em 1976 distava 200m da linha de costa e associou a erosão costeira à subsidência do litoral. Bastos (1997)⁸ comparou fotos aéreas de 1976 com a posição da linha de costa levantada por meio de GPS em 1996 e determinou uma taxa de recuo da linha de costa (erosão) de **7,5 m/ano**, sugerindo como causa a convergência de ondas para o pontal. Bastos e Silva (2000)⁹ **evidenciam a erosão das dunas frontais em Atafona** e recuo de 37 metros em 5 anos o que confirma as **taxas de 7 a 8 m/ano**, no entanto, apontam para este curto período um equilíbrio nos volumes de areia no sistema praia-duna. Ribeiro (2005)¹⁰, usando técnicas de cartografia digital, mapeou a ocorrência da erosão costeira e confirmou a tendência erosiva em taxas de até **7,8 m/ano**, no período entre 1954 e 2004 (Figura 2). O autor constata ainda que **a área erodida em Atafona fornece materiais para a acumulação (progradação) de areias na praia de Grussaí**.

⁴ termo náutico que indica o lado ou sentido para onde vão os sedimentos ou a corrente, em relação a um ponto de referência.

⁵ *Sand Wars* é um excelente documentário produzido por Denis Delestrac sobre o tema de extração irregular de areias que silenciosamente ganhou proporções alarmantes no mundo inteiro.

⁶ MUEHE, D. Aspectos Gerais da Erosão Costeira no Brasil. Revista Mercator, v. 4, n. 7, p. 97-110, 2005

⁷ ARGENTO, M.S.F. 1989. The Paraíba do Sul retrogradation and the Atafona environmental impact. In: Neves, C. & Magoon, O.T. ed. Coastlines of Brazil. Publish: American Society of Civil Engineers, New York. 267-277.

⁸ BASTOS, A. C. Análise morfodinâmica e caracterização dos processos erosivos ao longo do litoral norte fluminense, entre Cabiúnas e Atafona. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geofísica Marinha) Programa de Pós-graduação em Geologia e Geofísica Marinha. Universidade Federal Fluminense. Niterói (RJ) 48-119 p, 1997.

⁹ BASTOS, A.C.; SILVA, C.G. 2000. Caracterização Morfodinâmica do Litoral Norte Fluminense, RJ, Brasil. Revista Brasileira de Oceanografia. Vol. 48. p 41-60.

¹⁰ RIBEIRO, G.P. 2005. Tecnologias Digitais de Geoprocessamento no Suporte à Análise Espaço Temporal em Ambiente Costeiro. Tese (Doutorado em Geografia). Universidade Federal Fluminense. 223p.

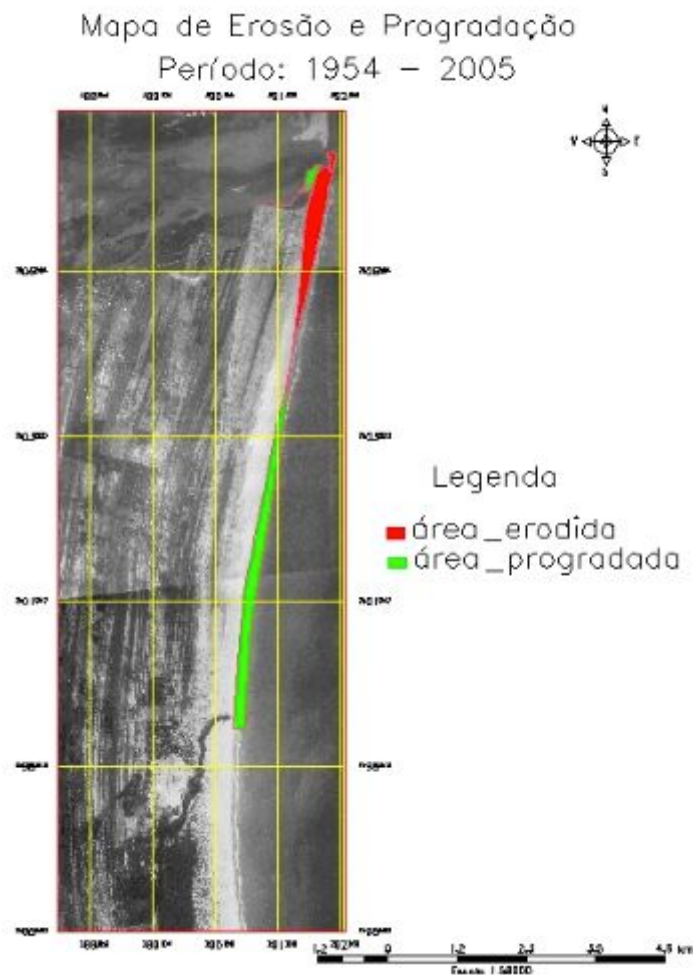


Figura 2. Mapeamento de áreas erodidas e acumuladas entre Atafona e Grussaí, no período entre 1954 e 2005. Extraído de Ribeiro, 2005.

Dieter Muehe¹¹, expoente sobre o tema Erosão Costeira no país, aponta que **as causas da erosão localizada em Atafona não estão totalmente esclarecidas**, mas que a **redução das descargas fluviais** líquidas e sólidas, principalmente após à transposição das águas para o sistema Lajes-Guandu na Barragem de Santa Cecília localizada 382 km à montante da foz, **alterou a interação entre o rio e o oceano** o que favoreceu a **deposição de sedimentos na desembocadura fluvial** (assoreamento) e conseqüentemente **modificou a direção e intensidade dos processos atuantes sobre o estuário e a linha de praia** (Costa; Neves, 1993¹²; Costa, 1994¹³). Ainda de acordo com Muehe¹⁴, **a presença**

¹¹ MUEHE, D. (org) Erosão e Progradação do Litoral Brasileiro. MMA - Ministério do Meio Ambiente. 476p. 2006.

¹² COSTA, G.; NEVES, C. F. O estuário do rio Paraíba do Sul. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 10.; SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO CONE SUL, 1., 1993, Gramado, Rio Grande do Sul. v. 2, p. 31-40, 1993.

¹³ COSTA, G. Caracterização histórica, geomorfológica e hidráulica do estuário do Paraíba do Sul. Dissertação de mestrado. Departamento de Geologia da UFRJ, Rio de Janeiro, 1994.

de um **guia-corrente submerso**, se estendendo mar afora, em continuação à borda direita do canal fluvial, testemunho da antiga posição da desembocadura, e ainda, **o recobrimento de lamas impedindo o transporte transversal de areias entre a zona submersa e emersa da praia**¹⁵ constituem elementos importantes na ruptura do balanço sedimentar em Atafona, que, ainda de acordo com o autor, **para se estabilizar, depende altamente da ação de ondas que possam promover o transporte litorâneo de areias de sul para o norte** para contrabalançar o **transporte persistente no sentido norte-sul** que é o padrão para a área entre Atafona e Grussaí.

Por mais difícil e dispendioso que seja intervir em fluxos e processos naturais em áreas costeiras, sobretudo com obtenção de sucesso e minimização de impactos negativos, **nossa capacidade de observar, monitorar, medir, explicar, divulgar e propor ações inovadoras vem aumentando**, considerando o crescente uso de técnicas modernas de levantamento e processamento de dados. De acordo com Nordstrom (2010)¹⁶ **são esses resultados que devem subsidiar o dimensionamento de propostas de intervenção que visem a recuperação ambiental de praias, dunas e restingas.**

Para tal subsídio técnico, neste relatório, serão expostas a seguir as informações mais relevantes sobre o meio físico para a área de Atafona na medida em que fornecem entendimentos sólidos sobre a erosão costeira, em seguida, serão expostas algumas práticas em recuperação de áreas em erosão (página 20) e, por fim, apresentada uma proposta básica (página 23) e inicial de intervenção que permita conter o avanço da erosão costeira e reequilibrar a linha de costa junto com algumas recomendações (página 34 e 35). As soluções são pensadas com base na **recuperação e reabilitação do sistema praia-duna** e visam **restabelecer as condições naturais, os serviços ecossistêmicos de proteção à costa** e a reconstituição dos habitats.

Erosão Costeira em Atafona - Aspectos Gerais do Meio Físico

A localidade de Atafona, município de São João da Barra, litoral norte fluminense, está inserida na porção terrestre da Baía de Campos. O contexto geológico local remete a um **depósito sedimentar arenoso** construído pela deposição flúvio-marinha. Denomina-se

¹⁴ MUEHE, D. O trapeamento de areias por recobrimento de lamas como mecanismo de rompimento do balanço sedimentar. Workshop 10, Balanço de sedimentos litorâneos e aplicações em gerenciamento de processos erosivos. CONGRESSO BRASILEIRO DE OCEANOGRAFIA, 1., Itajaí, Santa Catarina, 2004. Workshop 10.

¹⁵ MUEHE, D.; SPERLE, M; TESSLER, M.G.; SOUZA, S.R. Can the trapping of shoreface sand by mud layers induce coastal erosion? The example of the Paraíba do Sul river outlet. northern Rio de Janeiro state. Note. Brazilian Journal of Oceanography, v. SI-58, n.1, p. 65-68.

¹⁶ NORDSTROM, K. F. Recuperação de praias e dunas. São Paulo: Oficina de Textos, 2010, 263p.

delta ou, especificamente, Complexo Deltaico do rio Paraíba do Sul, a construção da planície costeira através da sucessão de **cristas de praia**¹⁷ (amarelo na Figura 3) associadas ao recuo do nível do mar nos últimos 5.000 anos¹⁸.

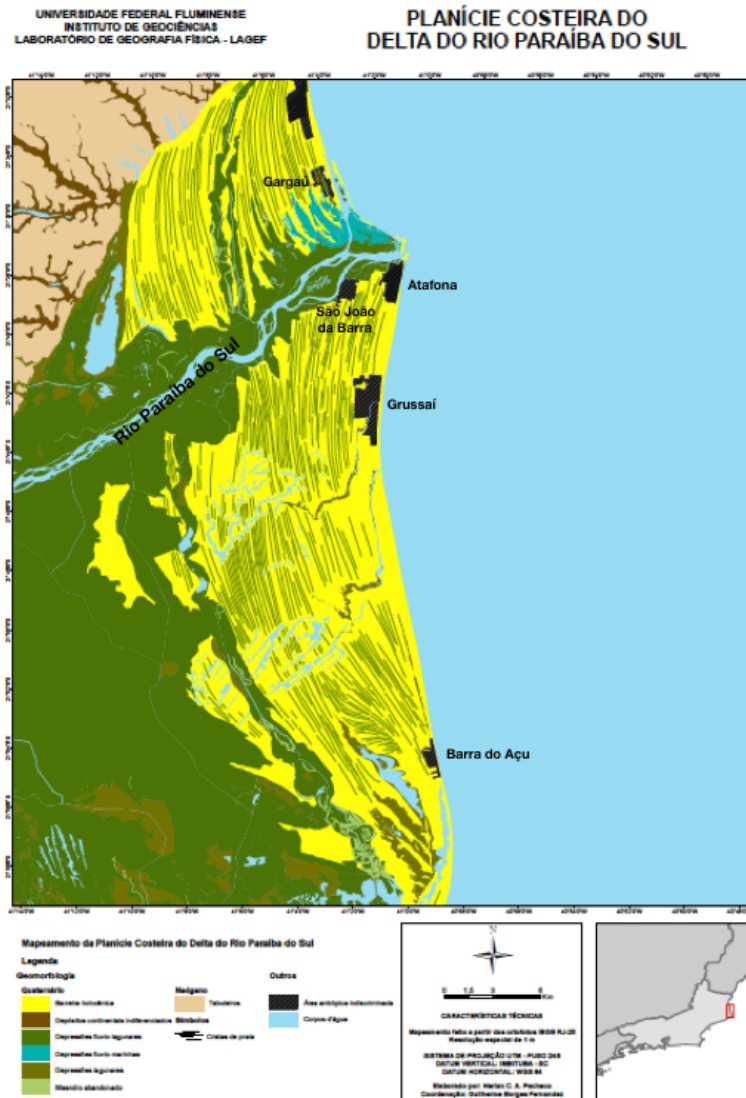


Figura 3. Planície Costeira do Rio Paraíba do Sul. Em amarelo o destaque para a planície arenosa de cristas de praia construída majoritariamente nos últimos 5.000 anos. Em preto, destaque para os núcleos urbanos instalados na planície. Fonte: Laboratório de Geografia Física. Instituto de Geociências. UFF. Cortesia do Prof. Guilherme Fernandez.

Esse delta é dominado pela ação das ondas oceânicas e pelas correntes longitudinais por elas geradas, mas também equilibrado pela ação das marés e pelo fluxo fluvial. No entanto, são as ondas oceânicas que, em última análise, promovem alterações através dos mecanismos de erosão, transporte transversal e longitudinal e deposição de

¹⁷ ou paleopraias

¹⁸ DIAS, G.T.M.; GORINI, M.A.A. Baixada Campista: Estudo morfológico dos ambientes litorâneos. In: Anais do XXXI Congresso Brasileiro de Geologia, Camboriú. v. 1.n. 588-602. 1980.

areias, fazendo com que continuamente, o delta busque sua condição de **“equilíbrio” frente à disponibilidade de areias** e a **hidrodinâmica dominante**. A hidrodinâmica dominante é função das condições climáticas e meteoceanográficas atuantes, a saber: regime de chuvas, vazões fluviais, marés, ventos e ondas.

O **regime de chuvas** na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul e sobretudo o uso doméstico, agropecuário, industrial e o **controle do fluxo fluvial exercido por barragens** vai determinar as **oscilações sazonais na vazão fluvial** e, especialmente no baixo curso, a **capacidade do rio em transportar areias até o mar**. A rede de drenagem da bacia do rio Paraíba do Sul ocupa uma área de aproximados 57 mil km², dividida entre os estados do Rio de Janeiro, São Paulo e Minas Gerais. Até São João da Barra o rio percorre¹⁹ 1.180 km. As águas desse rio abastecem cerca de 15 milhões de pessoas a grande maioria (87%) residente em áreas metropolitanas. Em sua bacia e utilizando suas águas estão inseridos 180 municípios (AGEVAP, 2006²⁰), cerca de de 7.000 indústrias e 6.000 propriedades rurais grandes, médias ou pequenas.

Dados integrados por Marengo e Lincoln (2005)²¹ indicam que os maiores volumes de **chuvas ocorrem no verão** e nas áreas mais altas da bacia hidrográfica (serras do Mar e da Mantiqueira) com volumes próximos a 2.250 mm/ano. No geral, nos meses entre dezembro e fevereiro ocorrem os maiores volumes de chuvas (em média 250 mm/mês) e no inverno os menores (inferior a 50 mm/mês). A média mensal integrada, considerando o período 1930-2000, para toda a bacia hidrográfica é de 122 mm/mês (1.450 mm/ano) e, neste período, **não foram verificadas tendências positivas ou negativas significativas no volume de chuvas** na bacia do rio Paraíba do Sul apesar de haver fortes variações interdecadais.

Sobre os **dados de vazão**, no baixo curso, as **tendências são negativas** (Figura 4) possivelmente pelos **efeitos das regularização de vazões por barragens e outros usos** e certamente **não pelos efeitos das oscilações das chuvas**.²²

¹⁹ AMORIM, D.D.; FERREIRA, M.E. Um estudo sobre a qualidade das águas do Rio Paraíba do Sul no Vale do Paraíba do Sul no período de 1978 a 1994. Resumos do XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Belo Horizonte, MG, 2000.

²⁰ AGEVAP - Associação Pró-Gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul - Resumo Diagnóstico dos Recursos Hídricos Relatório Final. Elaboração: Fundação COPPETEC Laboratório de Hidrologia e Estudos de Meio Ambiente PSR-010-R0 Novembro - 2006

²¹ MARENGO, J.A.; LINCOLN, M.A. Tendências hidrológicas da bacia do rio Paraíba do Sul. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 20, n. 2, p. 215-226, 2005.

²² MARENGO, J.A.; TOMASELLA, J.; UVO, C.R.B. Trends in streamflow and rainfall in tropical South America: Amazonia, eastern Brazil and northwestern Peru. Journal of Geophysical Research, v. 103, p. 1775-1883, 1998.

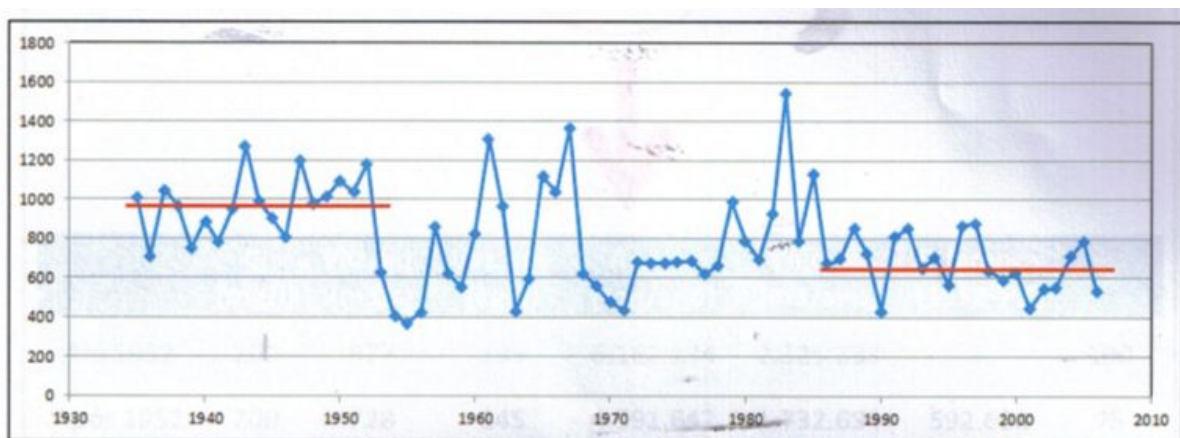


Figura 4. Médias anuais das vazões líquidas para a estação Campos. Destaque para as linhas de tendência em vermelho entre os períodos 1930-1950 e 1980-2010. Dados da Agência Nacional de Águas. Extraído de INPH, (2015)²³

Dados quinzenais medidos sob a ponte Barcelos Martins, em Campos dos Goytacazes, indicam **reduções acentuadas da vazão nos últimos cinco anos quando comparadas com séries históricas** (Figura 5). Essa posição de medição é a última antes do rio chegar ao oceano, revelando assim, tudo o que acontece com as águas do rio à montante. De acordo com os dados, **julho e agosto são os meses com as menores vazões** enquanto que **janeiro e dezembro apresentam as maiores vazões**.

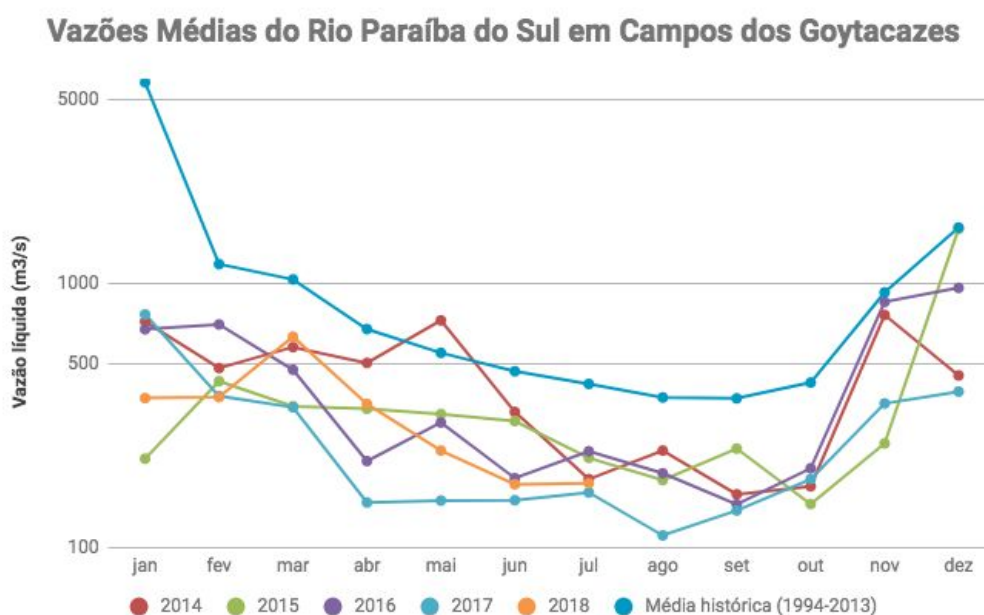


Figura 5. Dados de vazões (m^3/s) do rio Paraíba do Sul medidos sob a ponte Barcelos Martins. Amostragem quinzenal. Dados obtidos pelo Laboratório de Ciências Ambientais (LCA) da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF). Cortesia da Prof. Marina Suzuki.

²³ INPH - Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias. Anteprojeto de Proteção e Restauração da Praia de Atafona - Município de São João da Barra - RJ. INPH 026 / 2015.

Na Bacia de Campos as condições de **ventos e ondas** oceânicas são geradas pelas oscilações atmosféricas sobre o oceano Atlântico Sul. Estas condições já foram estudadas por diversos autores²⁴. O **regime de ventos** é fundamental para se entender a ação das ondas oceânicas em determinado segmento do litoral e, para a área em questão, duas massas de ar são responsáveis pela circulação atmosférica e oceânica: Massa de Ar Tropical Marítima, que ocorre sob influência do centro de ação denominado Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) responsável pelas condições de tempo bom; e Massa Polar Marítima, quando existe invasão de frentes frias vindas do sul do Atlântico, associada ao Anticiclone Polar, que se situa atrás das frentes frias, responsável pelas condições de tempestade. Santos (2006)²⁵, utilizando dados da DHN²⁶ entre 1976 e 2000, aponta que a **circulação atmosférica de tempo bom é responsável pelos ventos das direções Norte, Nordeste e Leste** e os mesmos ocorrem em cerca de 56% do tempo com velocidades médias de 22 km/h. Já os **ventos associados à passagem de frentes frias são das direções Sul, Sudeste e Sudoeste** com velocidades médias de 16 km/h, ocorrendo em cerca de 34% do tempo. A Figura 6 apresenta a **predominância do vento Nordeste** para a Bacia de Campos.

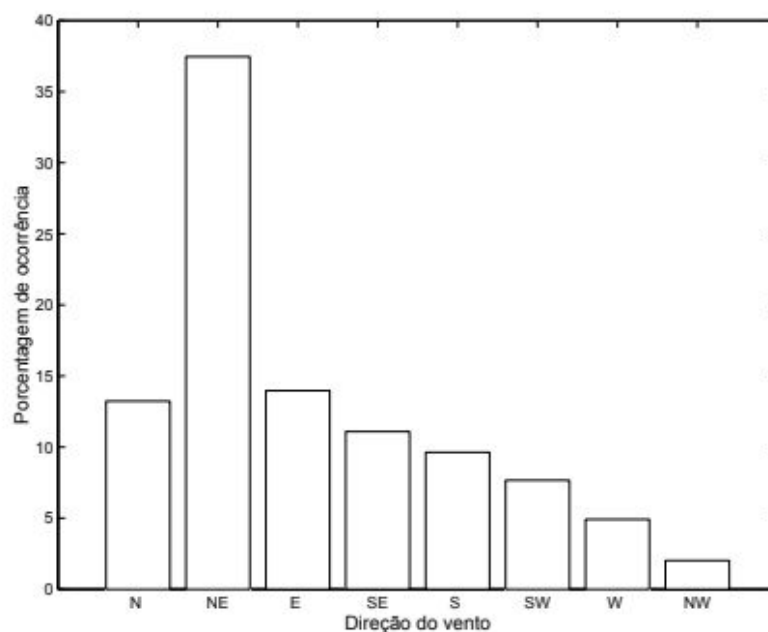


Figura 6. Histograma de ventos na porção oceânica da Bacia de Campos, com destaque para a maior frequência dos ventos de Nordeste (NE). Extraído de Pinho, 2003.

²⁴ uma revisão inicial pode ser feita em AMORIM, I.B.S; BULHÕES, E. Análise das condições sinóticas de eventos de ondas de tempestade no litoral Norte Fluminense. Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego, Campos dos Goytacazes/RJ, v.10 n.1, p. 253-279, jan./jun. 2016

²⁵ SANTOS, R. A. Processos de Erosão e Progradação entre as praias de Atafona e Grussaí-RJ. Monografia de Graduação apresentada ao Curso de graduação em Geografia da UFF. 48p. UFF, Niterói, 2006

²⁶ Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil

Sobre o **clima de ondas**, estudos do grupo de Engenharia Oceânica da COPPE/UFRJ apresentam resultados e produtos para aplicações da indústria *offshore* e, dentre esses, destaca-se o trabalho de Pinho (2003)²⁷ que caracteriza os estados de mar na Bacia de Campos em quatro situações: 1) Bom tempo (mares de Norte, Leste e principalmente Nordeste), que ocorre quando o sistema de alta pressão do Atlântico Sul (ASAS) domina a circulação; 2) Bom tempo com marulhos de Sul, situação de bimodalidade bastante frequente; 3) Mau tempo de Sudoeste, caracterizados por mares de Sudoeste e Sul, sempre que uma frente fria passa pela Bacia de Campos e, por fim; 4) Mau tempo de Sudeste, quando após a passagem de uma frente fria, um anticiclone polar domina a circulação. Campos (2009)²⁸ mostra que as condições de **Mau tempo de Sudoeste promovem as maiores ondulações que atingem a região oceânica da Bacia de Campos**.

No entanto, **as condições de ondas em mar aberto não são necessariamente as mesmas na costa** e, especificamente para a área de Atafona, Souza (2011)²⁹ identifica **concentração de energia de ondas para a área do pontal** por efeito de refração de ondas e Souza, Bulhões e Amorim (2015)³⁰ identificam que a área de **Atafona é parcialmente protegida das ondas geradas por ciclones extratropicais e frentes frias** associadas, enquanto que **a maior energia de ondas em Atafona está associada a eventos com ondas de Leste e Leste-Nordeste** (condição de Bom tempo) **associadas a ventos fortes de Nordeste**, podendo atingir, em casos extremos, alturas de até 3,5m nas proximidades do pontal. Essa condição de **ventos extremos de Nordeste** foi identificada por Campos (2009) e **ocorrem principalmente no outono e primavera**.

A Figura 7 é inédita e mostra as **oscilações nas alturas de ondas para a zona de arrebenção na área de Atafona** resultado de simulações realizadas para águas rasas entre janeiro de 2004 e dezembro de 2016. Em preto aparecem as oscilações na altura significativa de ondas que representa a **altura média** de $\frac{1}{3}$ das maiores ondas. Em azul claro aparecem os resultados da **altura máxima** de ondas. As setas indicam as direções médias de ataque das ondas na linha de costa. Os dados simulados no período indicam que **altura significativa média as ondas é de 0,76m**, altura significativa máxima de 1,98m e

²⁷ PINHO, U.F. Caracterização dos Estados de Mar na Bacia de Campos. Dissertação (Mestrado) Curso de Engenharia Oceânica, Departamento de Engenharia, UFRJ/COPPE. Rio de Janeiro. 123p, 2003.

²⁸ CAMPOS, R.M. Análise dos extremos de onda no Rio de Janeiro associados. Dissertação (Mestrado) Curso de Engenharia Oceânica, Departamento de Engenharia, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro. 269p. 2009.

²⁹ SOUZA, R.D. 2011. Propagação de Ondas para Águas Rasas no Litoral Norte Fluminense: Subsídios para Estudos de Erosão Costeira e Transporte de Sedimentos. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Geologia e Geofísica Marinha. Universidade Federal Fluminense. 156p.

³⁰ SOUZA, T.A.; BULHÕES, E. AMORIM, I.B.S. Ondas de tempestade na costa norte fluminense. Quaternary and Environmental Geosciences, v. 6, n. 2, p. 10-17, 2015

desvio padrão de 0,3m. Já os resultados de **altura máxima de ondas** apresentam **média de 1,49m** e máxima de 3,87m. **No geral as ondas são provenientes de Leste-Sudeste (115°)** com desvio padrão de 32°, ou seja, ocorrem entre as direções Leste-Nordeste e Su-Sudeste, sendo pouco comuns as exceções a este intervalo.

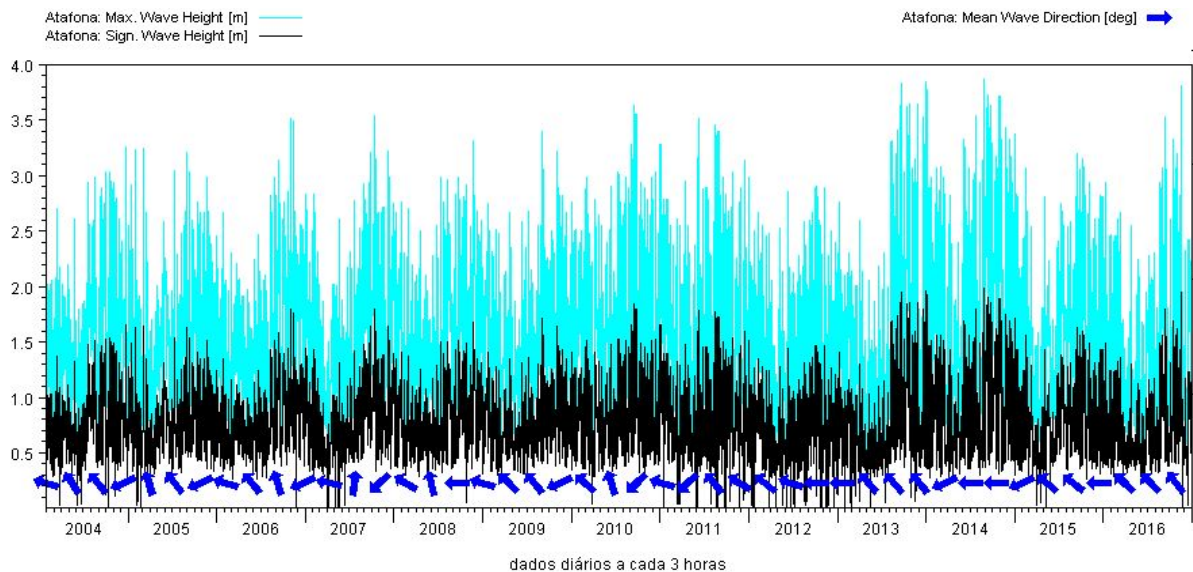


Figura 7. Resultados das simulações do modelo Mike 21 SW que estima o comportamento de ondas que se aproximam da praia de Atafona. Em preto as condições de altura significativa (média) de ondas e em azul claro o comportamento das alturas máximas de ondas. As setas em azul indicam a direção média. O período coberto foi de Janeiro de 2004 até dezembro de 2016 com dados espaçados de 3 em 3 horas. Fonte: Modelos Wave Watch III e Mike 21 SW.

Quanto às oscilações diárias da maré astronômica, dados da CN 1405³¹ e da tábua de marés para 2018³² indicam **nível médio do mar de 0,90m e máximo de 1,60m** acima do nível de redução³³. As marés são semidiurnas mistas com duas preamares e duas baixa-mares diárias.

Diversos pesquisadores nas áreas de Ciências Exatas e da Terra, desde o pioneiro Alberto Ribeiro Lamego e seus trabalhos publicados na década de 40 e 50³⁴, e outros autores, mais intensamente a partir do final dos anos 1970, se dedicaram a entender

³¹ Carta Náutica 1405 - Porto do Açú, publicada em 18/05/2018

³² CHM - Centro de Hidrografia da Marinha

³³ nível de redução da maré é o nível que corresponde a média das baixa-mares de sizígia, ou seja, o nível mais baixo de água que pode-se observar em determinada porção do oceano.

³⁴ LAMEGO, A. R. Restingas na Costa do Brasil. Divisão de Geologia e Mineralogia. Boletim número 96, DNPM, pp. 63. 1940.

LAMEGO, A. R. A Bacia de Campos na geologia litorânea do petróleo. DNPM-DGM, Bol. n° 113, 60 p. 1944.

LAMEGO, A. R. Ciclo Evolutivo das Lagunas Fluminenses. Divisão de Geologia e Mineralogia. Boletim número 118, DNPM, pp. 47. 1945.

LAMEGO, A. R. O homem e a restinga. Bibli. Geogr. Bras. Conselho Nacional de Geografia do Rio de Janeiro. 1946.

LAMEGO, A. R. Geologia das quadrículas de Campos, São Tomé, Lagoa Feia e Xexéu. Div. Geol. Min., DNPM, Bol. 154, Rio de Janeiro. 1955.

aspectos geológicos e geomorfológicos da planície do rio Paraíba do Sul, com elevado nível de detalhe e sofisticação, tendo a UFF assumido a liderança como a principal fonte desses trabalhos. Para maior detalhamento no tema, boas leituras são os trabalho de Dias e Kjevre (2009)³⁵ e Vasconcelos (2016)³⁶

Dominguez (1996)³⁷ e Bhattacharya e Giosan (2003)³⁸ destacam que em alguns **deltas assimétricos**, como o do Paraíba do Sul (Figura 8), ocorrem feições chamadas de “secundárias” e estas aparecem na forma de **dunas eólicas, pontais arenosos**, lagoas costeiras, ilhas barreiras, dentre outras. Deltas assimétricos ocorrem quando existem **diferenças significativas na forma e na deposição das areias entre os lados da foz** o que faz com que, eventualmente, um **lado da foz evolua (avance ou recue) em padrões distintos quando comparado ao outro lado**. Essas diferenças se dão basicamente pela **disponibilidade de areias junto à foz** e pela **direção com que as ondas oceânicas atacam a linha de costa**, o que vai determinar o **transporte de sedimentos**.

³⁵ DIAS, G. T. M. & KJERFVE, B. Barrier and Beach Ridge Systems of the Rio de Janeiro Coast. In: DILLENBURG, S. & HESP, P. Geology and Geomorphology of Holocene Coastal Barriers of Brazil. Berlin, Springer, pp. 225-248. 2009.

³⁶ VASCONCELOS, S.C. Morfoestratigrafia da Planície Costeira ao Norte do Rio Paraíba do Sul (RJ). Tese (Doutorado em Geografia). Instituto de Geociências, Universidade Federal Fluminense, 207p. 2016.

³⁷ DOMINGUEZ, J. M. L. The São Francisco strandplain: a paradigm for wave-dominated deltas. Geological Society Special Publication, 117: 217-231. 1996.

³⁸ BHATTACHARYA, J.P. & GIOSAN, L., Wave-influenced deltas: geomorphological implications for facies reconstruction. Sedimentology, 50: 187-210. 2003.



Figura 8. Visão aérea do delta assimétrico do rio Paraíba do Sul. Destaque para as cristas de praia e para a dispersão dos sedimentos junto ao mar. Areias usualmente são transportadas por arrasto junto ao fundo. Materiais mais finos como siltes e argilas (lamas ou “barro”) são transportados em suspensão e respondem pela coloração marrom da água. Fonte: Eiji Matsumoto, ano 1972.

Sobre o **transporte de sedimentos** é consenso que o mesmo é fundamental para os mecanismos de erosão e acumulação ao longo do litoral³⁹ e a construção de planícies costeiras. Para a área de Atafona o modelo do “**molhe hidráulico**”⁴⁰ (Figura 9), muito discutido e contestado na década de 80, fornece indicações sobre os mecanismos que operam a erosão costeira. Para os autores desse modelo **o sentido de transporte de sedimentos residuais junto a Atafona é de sul para norte**, ou seja, para quem olha pro mar, da direita para a esquerda.

³⁹ MUEHE, D. Geomorfologia Costeira. In: CUNHA, S.B. & GUERRA, A.J.T (Org). Geomorfologia: Exercícios, Técnicas e Aplicação. 2ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2002. Cap. 6, p. 191-238. 2002.

⁴⁰ DOMINGUEZ, J. M. L.; BITTENCOURT, A.C.S.P.; MARTIN, L. O Papel da deriva litorânea de sedimentos arenosos na construção das planícies costeiras associadas às desembocaduras dos rios São Francisco (SE-AL), Jequitinhonha (BA), Doce (ES), e Paraíba do Sul (RJ). Revista Brasileira de Geociências, v. 13, n. 2, p. 98-105, 1983.

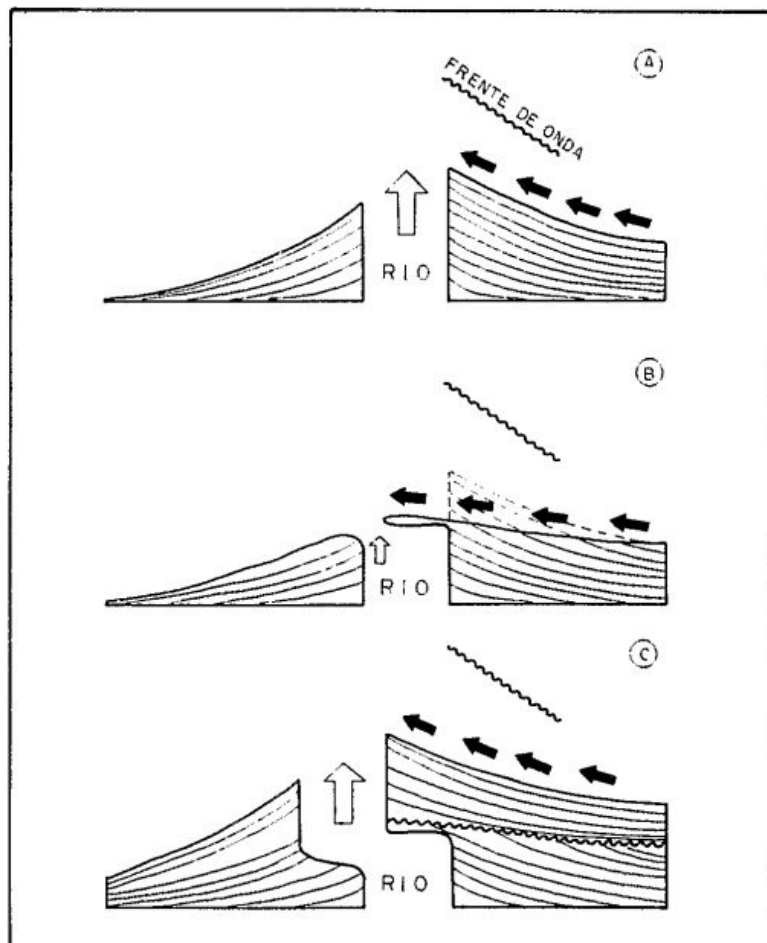


Figura 9. Modelo de “molhe hidráulico” proposto por Dominguez et al. (1983). Nesse modelo as variações no fluxo de água do rio junto à foz favorecem ou não a acumulação de areias junto à Atafona. Para entender o processo de erosão a fase B da figura daria a idéia que um fluxo reduzido do rio não permitiria a manutenção das areias junto à Atafona.

Seguindo o modelo da Figura 9, na situação (A) um **fluxo de cheia do rio favorece a acumulação de areias** junto à Atafona uma vez que as areias não conseguiriam mais seguir em direção ao norte (esquerda) devido ao impedimento do transporte promovido pela descarga do rio. Na situação (B), um **fluxo reduzido do rio favorece a erosão** junto à Atafona (margem direita da foz) uma vez que permite que as areias continuem sendo transportadas em direção ao norte (esquerda).

Na situação (C), têm-se que as oscilações desses mecanismos formariam uma acumulação, no tempo geológico, de uma **planície costeira marcada por truncamentos erosivos** (Figura 10) o que indicaria a condição assimétrica do delta pela maior ou menor projeção de feições como **pontais arenosos** e ilhas barreira. Sobre esse aspecto Dias

(1981)⁴¹ fala sobre hiato de deposição na seqüência de progradação do delta, que é em geral acompanhado de erosão costeira e Martin et al (1984)⁴², suportando o modelo de “molhe hidráulico”, reafirmam que os degraus presentes no curso do rio atual, estão associados ao bloqueio de transporte litorâneo de sedimentos arenosos pelo fluxo fluvial em períodos de cheia.



Figura 10. Alinhamentos, truncamentos e escalonamentos na seqüência de cristas de praia da planície deltaica do rio Paraíba do Sul na localidade de São João da Barra e Atafona. Essas feições indicam **antigas posições da praia e antigas fases de erosão costeira**. Fonte: Vasconcelos (2006)⁴³ extraído de Rocha (2009)⁴⁴

Com o foco em **quantificar o transporte litorâneo de sedimentos** (Figura 11), Cassar e Neves (1993) publicaram um estudo mais detalhado sobre os residuais de areias que seriam transportadas ao longo do litoral Norte Fluminense e, para o segmento de Atafona, o residual anual seria de **4.400 m³/dia de areias transportadas para o sul**, em direção à Grussaí, com maiores volumes entre os meses de setembro a novembro (5.600 m³/dia) e menores entre março e maio (2.900 m³/dia). Para esses autores a direção do

⁴¹ DIAS, G.T.M. O complexo deltaico do Rio Paraíba do Sul. IV Simpósio do Quaternário. Brasil. Publicação Especial n.2 (CTCQ/SBG). p. 58-88. 1981.

⁴² 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. Anais do XXXIII Cong. Bras. de Geologia, Rio de Janeiro .Vol.1, 84-97. 1984.

⁴³ VASCONCELOS, S. C. Dinâmica costeira na foz do rio Paraíba do Sul. Monografia de Graduação, Curso de Geografia - Universidade Federal Fluminense – UFF. Niterói, RJ, 2006. 52 p.

⁴⁴ ROCHA, T.B. 2009. Morfodinâmica costeira e gestão de Orla Marítima em costa sob influência fluvial: Borda meridional do atual delta do rio Paraíba do Sul (RJ). Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências. Universidade Federal Fluminense. 2009.

transporte nessa área é discordante do modelo de “molhe hidráulico”, outras discordâncias também foram levantadas por Gonçalves e Silva (2005)⁴⁵ e Machado (2009)⁴⁶ para os quais **o transporte de areias é também em direção ao sul.**



Figura 11. Direções dos residuais de transporte de sedimentos no entorno do Cabo de São Tomé, com destaque para forte transporte entre Atafona e Grussal em direção ao sul. Adaptado de Cassar e Neves (1993) por Muehe (2006).

Sobre as feições costeiras secundárias do Complexo Deltaico do rio Paraíba do Sul os **pontais arenosos** e as **dunas eólicas** são entendimentos chave para se caracterizar, se entender e propor soluções para o que acontece na localidade de Atafona.

Pontais arenosos são formados a partir da interação entre areias disponíveis e ação de ondas que atacam o litoral de forma não paralela promovendo o transporte longitudinal ao longo do litoral⁴⁷. Ressalta-se que, **para a formação do pontal o aporte de areias deve ser maior do que a capacidade das ondas em transportá-las**, o que revela a dependência do aporte fluvial para a manutenção dessas feições. Pontais arenosos tendem a ser extremamente dinâmicos em resposta à disponibilidade de areias e variações nas

⁴⁵ GONÇALVES, C. Z. & SILVA, C. G. Proveniência e distribuição dos minerais pesados no complexo deltaico do rio Paraíba do Sul. In: X Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, Guarapari, 2005.

⁴⁶ MACHADO, K. M. Dinâmica Sedimentar na Planície do Paraíba do Sul – RJ. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal Fluminense, Departamento de Geologia. Pós-Graduação em Geologia e Geofísica Marinha, Niterói, 2009.

⁴⁷ LEATHERMAN, S.P. Barrier island handbook. Coastal Publication Series. The University of Maryland. 92p. 1988.

correntes litorâneas e, no caso de Atafona, levantamentos mensais de precisão executados por Ribeiro (2005)⁴⁸, em base mensal, ilustram as variações no pontal arenoso junto à foz ao longo do ano de 2004 (Figura 12).

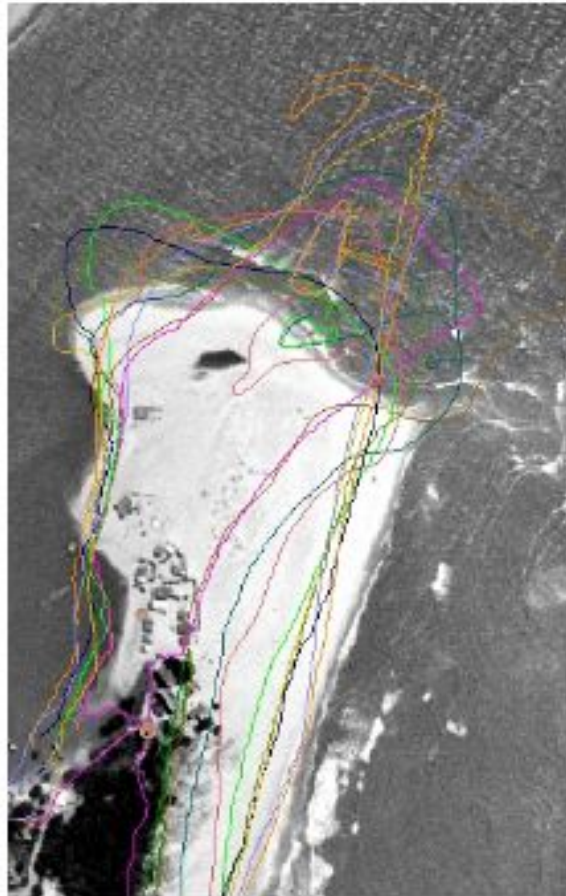


Figura 12. Sobreposição de levantamentos mensais da linha d'água (linhas coloridas) para mapear a forma emersa do pontal arenoso de Atafona, entre janeiro e dezembro de 2004. Fonte: Ribeiro (2005).

Dunas eólicas, nesse caso **dunas costeiras**, são depósitos empilhados de areias transportadas pela ação dos ventos através de mecanismos de saltação. Em Atafona as dunas encontradas são dunas primárias, também denominadas de **dunas frontais**. **Dunas frontais** são depósitos paralelos à costa, formadas no topo da praia pela deposição de areias transportadas pelo vento e barradas usualmente pela vegetação. São estruturas não migratórias, que **se desenvolvem em resposta a interações aerodinâmicas entre vegetação, transporte de areia e processos costeiros locais**⁴⁹. Quando a cobertura vegetal nas dunas é intensa, a mesma age barrando o transporte eólico o que favorece a

⁴⁸ RIBEIRO, G.P. 2005. Tecnologias Digitais de Geoprocessamento no Suporte à Análise Espaço Temporal em Ambiente Costeiro. Tese (Doutorado em Geografia). Universidade Federal Fluminense. 223p.

⁴⁹ HESP, P.A. 1988. Surf zone, beach, and foredune interactions on the Australian south east coast. Journal of Coastal Research, n.3, v.1, p.15-25, 1988.

deposição das areias transportadas por saltação e arrasto, resultando em espessamento vertical da duna⁵⁰.

A erosão costeira em Atafona relaciona-se ao crescimento das dunas frontais, o que permite a utilização do termo “dunas transgressivas e erosivas”⁵¹, cujo mecanismo está relacionado à fases de erosão da praia, formação de escarpas, disponibilização de areias e ação dos ventos de Nordeste promovendo o espessamento das dunas (Figura 13). Esse efeito gera dunas cada vez mais altas⁵² que, se não forem colonizadas por vegetação, tendem a migrar, soterrando áreas ao reverso.

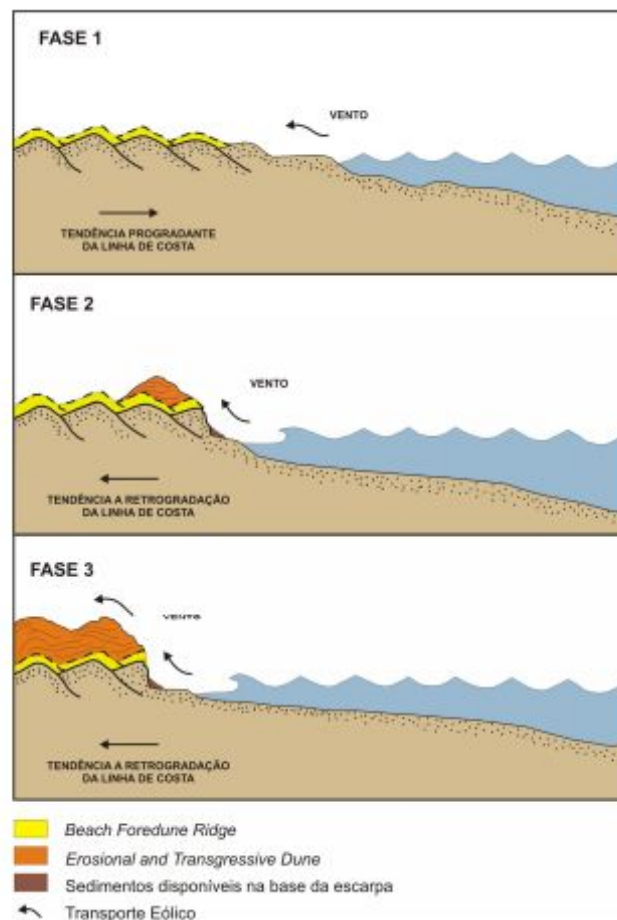


Figura 13. Modelo evolutivo para a formação de dunas em Atafona, extraído de Fernandez et al. (2008)⁵³.

⁵⁰ GOLDSMITH, V. Coastal sand dunes as geomorphological systems. In: C.H. Gimingham, W. Ritchie, B.B. Willetts and A.J. Willis, Editors, Coastal Sand Dunes Proceedings of the Royal Society of Edinburgh, vol. 96B, Roy. Soc. Edinb., Edinburgh, 1989.

⁵¹ “Erosional and Transgressive Dunes” ver FERNANDEZ, G.B.; PEREIRA, T.G.; ROCHA, T.B., 2009. Coastal dunes along Rio de Janeiro coast: evolution and management. Journal of Coastal Research. SI 56, 307 -311.

⁵² FERNANDES, G.B.; ROCHA, T.B.; PEREIRA, T.G.; VASCONCELOS, S.C. Modelo morfológico da origem e evolução das dunas na foz do rio Paraíba do Sul, RJ. In: VII Simpósio Nacional de Geomorfologia e II Encontro Latino-Americano de Geomorfologia, Belo Horizonte, 2008.

⁵³ FERNANDES, G.B.; ROCHA, T.B.; PEREIRA, T.G.; VASCONCELOS, S.C. Modelo morfológico da origem e evolução das dunas na foz do rio Paraíba do Sul, RJ. In: VII Simpósio Nacional de Geomorfologia e II Encontro Latino-Americano de Geomorfologia, Belo Horizonte, 2008.

Recentemente, Rocha et al (2018)⁵⁴ investigaram os aspectos integrados entre dinâmica de praia e duna frontal em Atafona utilizando dados de dez anos de monitoramento. Apontam que **as dunas mais altas em Atafona elevam-se à cotas de até 8,0m** acima do nível do mar, **são estreitas e migram em direção ao continente em taxas de até 3,0 m/ano** (Fase 3 da Figura 13) que acompanham as taxas atuais de erosão da praia.

Desta forma o melhor entendimento para o problema de erosão costeira em Atafona deve considerar o **sistema praia-duna frontal** como um sistema que ora erode e recua sobre as construções (Figura 14), ora avança em direção ao mar estabelecendo condições mais seguras. Essas oscilações são usualmente sazonais e refletem a **complexa interação de disponibilidade de areias com a ação de ventos, ondas e transporte litorâneo**.



Figura 14. Exemplos do sistema praia-duna que recua em direção ao continente e avança sobre áreas urbanizadas no litoral de Atafona desde a década de 70. Fotos recentes: Eduardo Bulhões.

Possibilidades de Mitigação da Erosão Costeira

Considerando o caráter complexo do meio físico litorâneo que, ao reunir e sobrepôr a dinâmica de processos naturais em escalas de longo, médio e curto termo somado à ações do homem e à toda incerteza em relação ao peso que cada uma dessas interações exerce no problema da erosão costeira que avança sobre a infraestrutura pública e privada instalada no núcleo urbano de Atafona, o entendimento mais simples sobre os fatos é que **o sistema praia-duna recua à taxas elevadas desde a década de 1970** e que até 2003 já havia destruído um total de 183 unidades residenciais cadastradas, distribuídas em 14

⁵⁴ ROCHA, T.B.; MACHADO, B.A.; SILVA, J.C.; MELLO, G.S.; PEREIRA, T.G.; FERNANDEZ, G.B. Interação morfoodinâmica entre a praia e duna frontal no delta do rio Paraíba do Sul (RJ) a partir de uma década de monitoramento. Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 19, n. 2, p.283-301, 2018

quadras, mais localizadamente na área do pontal⁵⁵. Considerando que muitas casas, sobretudo as mais simples, não haviam sido devidamente cadastradas, o número de edificações destruídas é superior. As figuras 15 e 16, extraídas do trabalho de Ribeiro (2005) ilustram a diminuição do pontal de Atafona entre 1961 e 2003 e a supressão de edificações.



Figura 15. Pontal de Atafona em 1961. Foto: DNOS. **Figura 16.** Pontal de Atafona em 2003. Foto: Gilberto Pessanha Ribeiro.

Outro entendimento que deve ficar claro é que **nenhuma opção de estabilização da linha de costa consegue parar permanentemente a erosão costeira**⁵⁶. O nível de proteção pretendida depende da opção escolhida, das dimensões do projeto e das condições específicas da área de intervenção. **Todas as opções de defesa do litoral precisam de manutenção**, com maior ou menor frequência, e requerem propostas de **mitigação dos impactos ambientais negativos** que proporcionam.

Para minimizar, impedir ou mitigar problemas de erosão costeira extrema são usualmente consideradas a execução de **obras de defesa do litoral**. As obras de defesa do litoral são intervenções que visam agir no balanço do transporte de sedimentos, estabilizar ou ampliar a linha de costa e defendê-la contra a erosão.⁵⁷ As obras de defesa do litoral podem ser classificadas, em um primeiro nível, entre obras “naturais” e “artificiais”. As **obras naturais espelham-se em proporcionar as mesmas condições que praias e dunas**, entendidas como linhas de defesa por excelência, proporcionam. Já as **obras artificiais, em áreas com transporte litorâneo de rumo dominante**, que é o exemplo de Atafona, devem

⁵⁵ AZEVEDO, M.V.H. Atafona, patrimônio mar adentro: Formação, planejamento e destruição do balneário de Atafona-RJ. Dissertação de Mestrado em Planejamento Regional e Gestão de Cidades. Universidade Cândido Mendes. 2004.

⁵⁶ STORM SMART PROPERTIES FACT SHEET 1.

<https://www.mass.gov/service-details/stormsmart-properties-fact-sheet-1-artificial-dunes-and-dune-nourishment>

⁵⁷ ALFREDINI, P; ARASAKI, E. Obras e gestão de portos e costas: a técnica aliada ao enfoque logístico e ambiental. Editora Blucher, 2a Edição, 776 p., 2009.

dispor essencialmente de estruturas de defesa perpendiculares, ou quase, à costa. Neste sentido, um anteprojeto entregue em 2015 pelo Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias (INPH)⁵⁸ ao município de São João da Barra, aponta a necessidade de instalação de um “campo de espigões” (Figura 17) somado à **alimentação artificial**⁵⁹ da praia de Atafona.



Figura 17. Proposta de um “campo de espigões” dimensionada pelo INPH para conter o avanço erosivo em Atafona.

A proposta especifica o dimensionamento de uma sequência de **9 espigões enraizados à costa**, utilizando blocos rochosos sobrepostos, com comprimento de 240m e espaçados de 400m entre si, com a **função de compartimentar a praia e evitar a perda de areias** pelos mecanismos que promovem o transporte litorâneo. Adicionalmente seria feita a **alimentação artificial da praia** incorporando areias de uma área de empréstimo próxima para compor uma praia entre cada um dos espigões. Os detalhes do anteprojeto estão disponíveis.

⁵⁸ INPH - Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias. Anteprojeto de Proteção e Restauração da Praia de Atafona - Município de São João da Barra - RJ. INPH 026 / 2015.

⁵⁹ *beach nourishment, beach fill ou beach replenishment*

Não fossem os **impactos negativos durante e após as obras**, facilmente exemplificados por experiências pretéritas no litoral brasileiro e facilmente previsíveis em Estudos de Impacto Ambiental, como, por exemplo: **redução dos atributos cênicos e paisagísticos** do balneário, prejuízo à fauna e flora local com a **destruição de habitats** (especialmente durante a fase de construção por onde passariam milhares de toneladas de caminhões, máquinas pesadas e blocos rochosos), redução da circulação de águas costeiras com o **possível comprometimento de balneabilidade**, compartimentação da praia, **trapeamento de resíduos sólidos** (lixo) junto às cavidades intrablocos das estruturas e, o mais grave, **transposição da erosão costeira** para a faixa de praia imediatamente ao sul do último espigão, o **custo excessivo** deste tipo de intervenção é, aparentemente, nos dias atuais, superior à capacidade financeira do município, sobretudo, considerando ainda, a oneração de milhares de munícipes para o favorecimento direto dos proprietários de imóveis à beira-mar.

Posto isso, **a busca para a solução mais factível e sustentável do problema da erosão costeira em Atafona**, que afeta na prática uma faixa de aproximados 2,0 km da orla do município, **deveria considerar inicialmente intervenções menos onerosas e com menor impacto ambiental negativo**.

Restauração Artificial do Sistema Praia-Duna

Considerando o problema a ser tratado - resumidamente, os volumes de materiais que deixaram de chegar à praia de Atafona desde que as vazões fluviais líquidas e sólidas foram abruptamente reduzidas e o déficit gerado pelo transporte longitudinal das areias remanescentes em direção ao sul, promovem a migração do sistema praia-duna em direção ao continente produzindo os efeitos conhecidos de erosão costeira em área urbanizada - **a proposta aqui defendida parte da dragagem e do bombeamento hidráulico de areias compatíveis de dentro da calha fluvial para o pontal de Atafona**, ao que se convencionou chamar aqui de **“transposição artificial de areias”** (exemplo na Figura 18) somado ao **espalhamento mecânico e supervisionado desses materiais numa faixa de 1,5 km para a construção de dunas e bermas artificiais** (exemplos nas Figuras 19 e 20).



Figura 18. Bombeamento de areias compatíveis com as nativas num projeto de “transposição artificial de areias”, ou, *sand bypass*.



Figura 19 e 20. Veículos de movimentação de terra e construção de bermas e dunas artificiais. Fonte: WHYY.org e Eduardo Bulhoes

Destaca-se inicialmente que projetos de recuperação ou **alimentação artificial de praias**⁶⁰ e a construção de **dunas artificiais** são as únicas intervenções de engenharia costeira que prevêm a adição de materiais semelhantes aos perdidos para repor o estoque e conter os avanços da erosão costeira sobre áreas urbanizadas.

Os **sistemas de transposição artificial de areias** visam suprir o déficit de sedimentos que, no caso de Atafona, deixou de abastecer a praia pelos motivos já

⁶⁰ beach nourishment

discutidos. Os **princípios desses sistemas são simples e consistem na dragagem, no transporte e na deposição das areias**, no entanto, algumas etapas operacionais partindo do design do sistema e das distâncias do transporte podem ser complexas e onerosas⁶¹ **Cabe ponderação para definir o melhor cenário e desenho para um sistema em Atafona** (Figura 21), sobretudo em função da posição da fonte de extração de areias.



Figura 21. Croqui em planta da proposta de **transposição artificial de areias** para a recuperação do sistema praia-duna frontal em Atafona. A possível fonte para extração de areias compatíveis ainda deve ser determinada. Uma vez determinada a fonte seria instalado um sistema de bombeamento móvel dessas areias que as levaria por dutos até a posição extrema do pontal. A partir de então seriam movimentadas mecanicamente areias por 1,5 km de linha de praia a ser restaurada o que representaria uma área de aproximada de 85.000 m². Já os volumes necessários para a alimentação artificial seriam calculados de acordo com os levantamentos das perdas verticais em perfil (m³/m).

De acordo com o USACE - Corpo de engenheiros militares norte-americanos⁶², **o preenchimento artificial do sistema praia-duna é a solução de melhor custo benefício para proteger o litoral da erosão costeira**. O consenso é que a construção ou recuperação do sistema praia-duna com a alimentação artificial de dunas e bermas (Figura 22) atende o problema da erosão costeira na medida em que **a duna protege a comunidade e a berma protege a duna; a duna age como uma barreira frente ao impacto de ventos e ondas; a duna reduz a possibilidade de inundações; a berma e a**

⁶¹ LOZA, P. Sand Bypassing Systems. Masters in Environmental Engineering. Universidade do Porto. 2008.

⁶² USACE - United States Army Corps of Engineers.

duna absorvem a maior energia de uma tempestade antes que ela afete as propriedades e infra-estrutura à retaguarda.

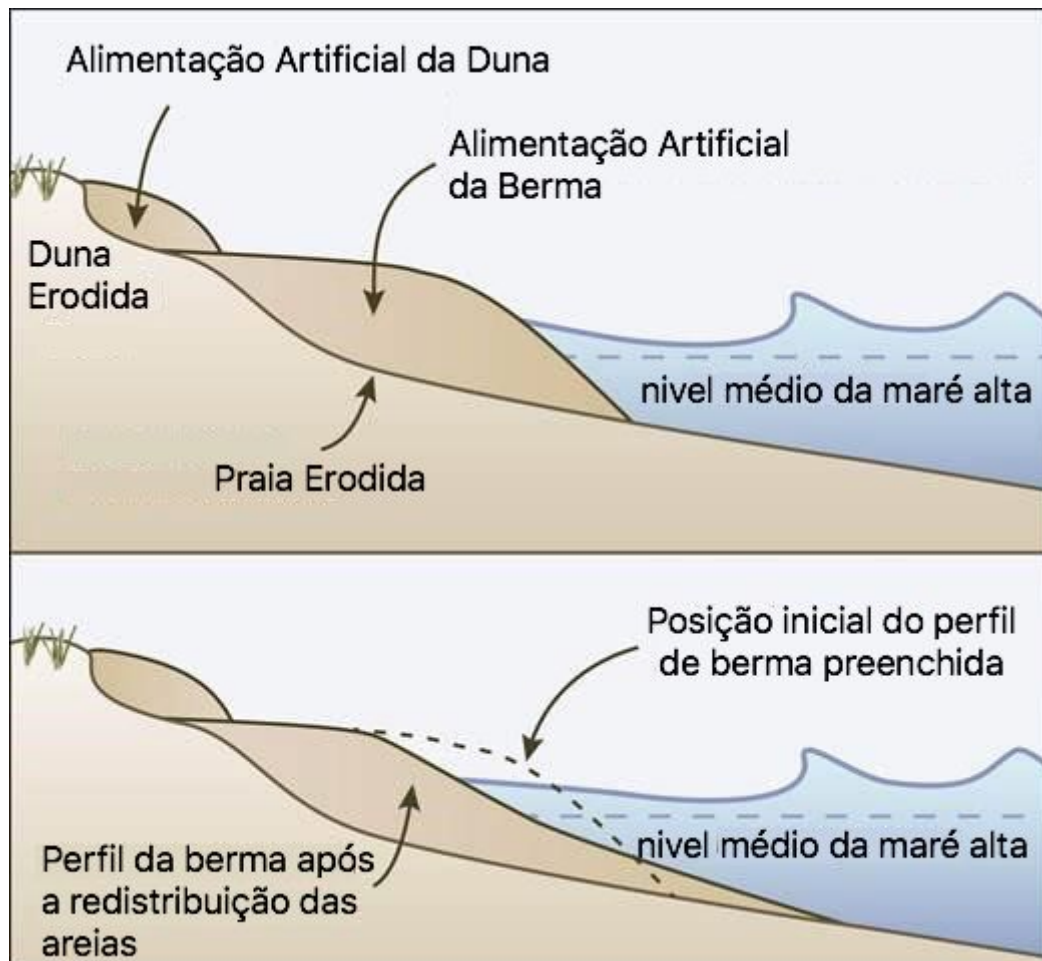
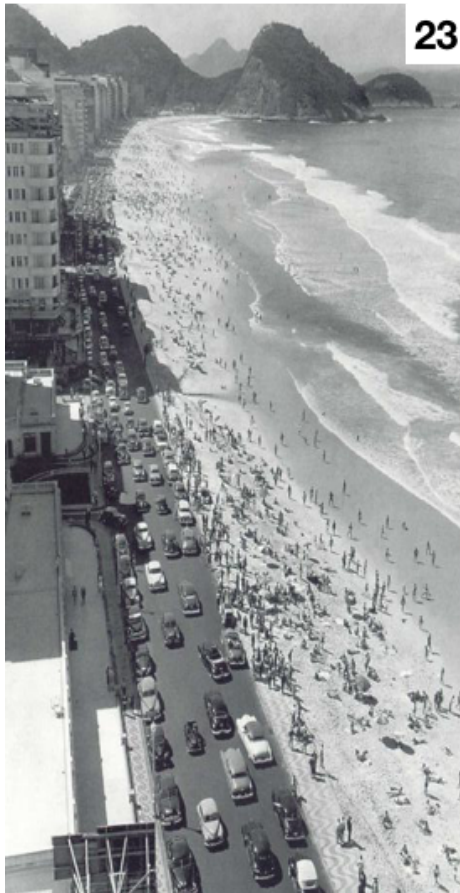


Figura 22. Nomenclatura técnica de um perfil de praia para o entendimento sobre as intervenções propostas para a construção de dunas e bermas artificiais.

Uma **percepção enganosa** muito comum nos projetos de alimentação artificial de praias e dunas **é que eles falham na medida em que são destruídos pelas ondas e precisam ser reconstruídos** quando, na verdade, esses projetos têm a finalidade de absorver a energia e a forma com que eles fazem isso é se movimentando e mudando suas formas. **A continuidade é uma das idéias chave nesses projetos de alimentação artificial** uma vez que, ao contrário das estruturas rígidas perpendiculares à costa (ex. espigões) que restringem a movimentação de areias “cobrindo um lado e descobrindo o outro”, as areias que são eventualmente erodidas desses projetos serão livremente movimentadas para outras áreas do litoral (exemplo zona submarina próxima ou praia à sotamar) o que não compromete sua estabilidade.

No Brasil, **o principal exemplo desse tipo de intervenção foi executado na praia de Copacabana** (Figuras 23, 24 e 25), em 1969-1970, visando defender a orla urbanizada

do ataque de ondas de tempestade e ampliar a praia recreativa. Vera Cruz (1972)⁶³ apresenta o artigo onde estão resumidos os estudos ambientais e procedimentos técnicos para essa intervenção e aponta o crescimento de uma praia cuja largura média era de 55m para 140m utilizando 3,5 milhões de m³ de areia.



Figuras 23, 24 e 25. Antes, durante e depois do projeto de alimentação artificial da praia de Copacabana. Fotos: Acervo Burle Marx.

No entanto, as **diferenças são muito grandes quando compara-se Copacabana com a área de Atafona**, pela dimensão, pelo apelo turístico e sobretudo pelo intenso transporte de sedimentos nessa última e maiores alturas de ondas na primeira, o que obviamente muda por completo o dimensionamento do projeto. Outros procedimentos de recuperação artificial de praias no Brasil podem ser citados em Maratáizes - ES onde a intervenção de alimentação artificial foi feita em consórcio com a construção de espigões e outras estruturas de contenção visando conter a erosão costeira e, **apesar de resolver localmente, transportou o problema da erosão costeira para áreas imediatamente ao sul**. Na praia de Iracema, em Fortaleza-CE, intervenções para a recuperação artificial da

⁶³ Vera-Cruz, D. (1972) - Artificial nourishment of Copacabana beach. Proceedings 13th Coastal Engineering Conference. New York: ASCE, 141-163.

praia também foram feitas em consórcio com a construção de espigões e muros de contenção e já preveem nova intervenção para este ano. Outros segmentos do litoral da capital cearense experimentam problemas de erosão costeira e buscam obras de recuperação artificial do perfil das praias, que viram suas dinâmicas afetadas sobretudo a partir da construção do Porto de Mucuripe na década de 40.⁶⁴ Na cidade de Paulista-PE, na praia do Janga, Oliveira et al.⁶⁵ relatam que a adição de areias foi necessária para recuperar áreas onde os quebra-mares foram instalados.

Nos EUA, e em boa parte do mundo, os proprietários de imóveis na faixa costeira historicamente viam as dunas como empecilhos para avistar o mar e como redutoras da acessibilidade à praia. Ainda **no passado, os projetos de recuperação artificial de praias mantinham o foco no alargamento da praia e não na recuperação ou construção de dunas**. Após a passagem do furacão Sandy (outubro de 2012), e após contabilizados seus resultados catastróficos, o contraste óbvio entre os segmentos litorâneos que foram **protegidos da tempestade pela absorção da energia pelas dunas** com aqueles segmentos que não continham dunas e contabilizaram perdas materiais maiores⁶⁶ houve uma mudança sólida na opinião pública sobre a presença das dunas, sobretudo na opinião pública. As **dunas passam então a ser vistas como commodities inestimáveis para a valoração dos imóveis situados na frente da praia**. O volume de investimentos federais nos EUA para a proteção costeira vem sendo direcionado para projetos de recuperação artificial de praias uma vez que esses são considerados como defesas “leves”, flexíveis, naturalmente reversíveis e facilmente modificáveis, em oposição à projetos “rígidos” que são mais onerosos e permanentes mas reduzem a resiliência da costa ao impedir o fluxo natural de águas e materiais. Diversos projetos na costa leste (ex. Massachusetts⁶⁷, New Jersey⁶⁸), oeste (ex. Oregon⁶⁹ e Califórnia⁷⁰) e no golfo do México⁷¹ podem ser tomados como exemplo nos EUA onde esse tipo de prática (Figura 26) é atualmente a mais comum para resolver questões sobre erosão costeira⁷². Entre 1950 e 2006 o USACE⁷³ ajudou a construir

⁶⁴ FECHINE, J.A.L. Alterações no perfil natural da zona costeira da cidade de Fortaleza, Ceará, ao longo do século XX. Dissertação de Mestrado (Geografia). Universidade Federal do Ceará, 2007.

⁶⁵ OLIVEIRA, P.F.P.; SILVA, H.A.; SANTANA, N.M.G.; MANSO, V.A.V. Avaliação do Comportamento do Aterro Hidráulico da Praia do Janga, Paulista/PE, decorrente da Dinâmica Praial e da Urbanização. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 2, p. 374-385, 2012.

⁶⁶ CHARBONNEAU, B.R. A review of dunes in today's society. Coastal Management, v. 43, p. 465-470, 2015.

⁶⁷ <https://www.mass.gov/stormsmart-coasts-program>

⁶⁸ NORDSTROM, K.F.; ALLEN, J.R.; SHERMAN, D.J.; PSUTY, N.P. Management considerations for beach nourishment at Sandy Hook, New Jersey, U.S.A. Coastal Engineering, v. 2, 1978.

⁶⁹ ALLAN, J.C.; KOMAR, P.D. A dynamic revetment and artificial dune for shore protection. Proceedings of the 28th Conference on Coastal Engineering. Cardiff, Wales, ASCE.

⁷⁰ Chapter 9. Beach Erosion and Flooding Adaptation. City of Del Mar, California.

⁷¹ TREMBANIS, A.C.; PILKEY, O.H. Summary of beach nourishment along the US Gulf of Mexico shoreline. Journal of Coastal Research, v. 14, n. 2, p. 407-417, 1998

⁷² HOUSTON, J. The economic value of beaches – A 2008 update. Shore & Beach, vol. 76, n. 3, p. 22-26, 2008.

aproximadamente 550km de projetos de recuperação artificial de praias no litoral norte-americano.



Figura 26. Exemplo de alimentação artificial do sistema praia-duna em Brant Beach (New Jersey) em junho de 2013. Foto: USACE - U.S. Army Corps of Engineers

Na Holanda, **desde a idade média os habitantes se protegem contra o avanço do mar construindo diques** de frente ao mar e ao longo dos canais fluviais. **Nas áreas litorâneas onde existiam dunas os diques não eram necessários.** Nesse país, **as dunas são historicamente conhecidas por defender o litoral**⁷⁴. Na Holanda as dunas além de fornecer valiosa proteção à costa são valorizadas atualmente por abastecer as **fontes de água potável através da infiltração**, por criar áreas de recreação, e por serem áreas críticas do ponto de vista ecológico. Nesse sentido, no país onde 26% do território e 21% da população vive abaixo do nível do mar, **por determinação governamental**⁷⁵, **as obras de defesa do litoral são construídas para manter à costa na posição atual preferencialmente através do uso de alimentação artificial do sistema praia-duna.** Cabe ainda citar que o maior projeto sobre alimentação artificial de praias visa conter a erosão costeira e preparar a costa holandesa para a elevação do nível do mar. O projeto se chama *Sand Engine*, ou “motor de areia” (Figura 27) e muda o paradigma de projetos para defesa do litoral holandês ao se **antecipar aos problemas de erosão e inundação**, ao

⁷³ USACE - United States Army Corps of Engineers. Shore Protection Assessment. Beach Nourishment: How beach nourishment projects work.

⁷⁴ VERHAGEN, H.J. Coastal protection and dune management in the Netherlands. *Journal of Coastal Research*, v. 6, n. 1, p. 169-179, 1990

⁷⁵ MINISTER OF PUBLIC WORKS, 1988. Letter to parliament on coastal policy, 25 march 1988 (In Dutch)

concentrar volumes de 21 milhões de m³ em um mega projeto que visa atender cerca de 20 km de linha costa em 20 anos⁷⁶ a um custo estimado de 81 milhões de dólares o que é entendido como menos oneroso e mais eficiente do que implementar projetos individuais e setorizados ao longo do litoral.

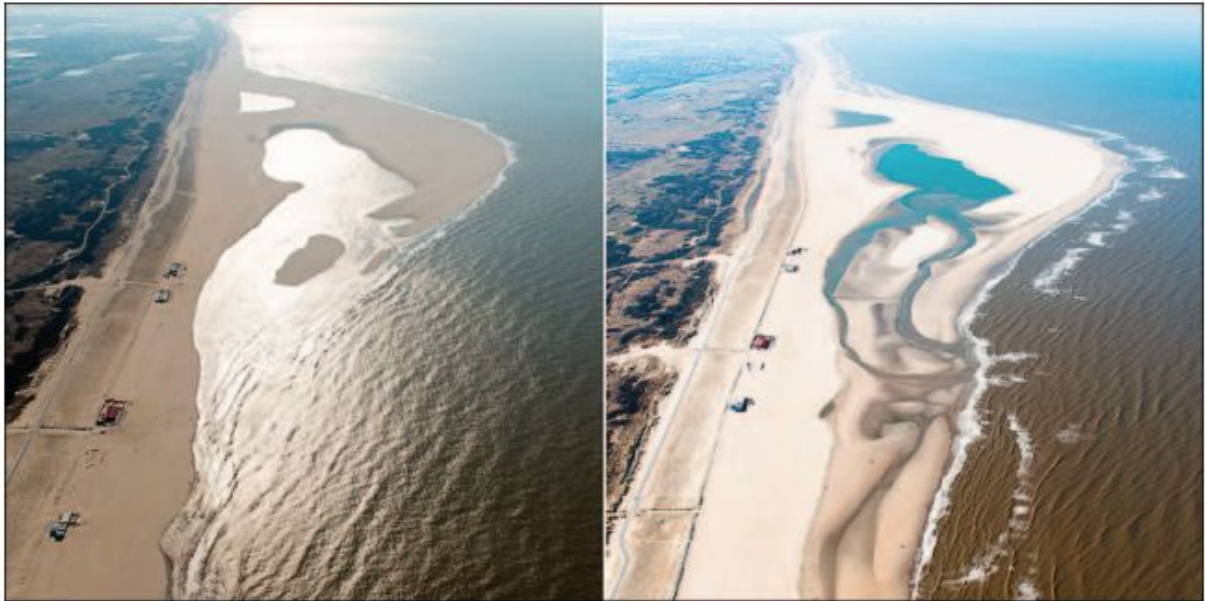


Figura 27. Vista aérea de sul para o norte do *Sand Engine* na Holanda em condições de maré alta (esquerda) e maré baixa (direita). Fonte: Rijkswaterstaat/Joop van Houdt

Na Espanha, a importância das intervenções em **alimentação artificial de praias no Mar Mediterrâneo cresceu desde o final do século XX** visando potencializar impactos positivos no turismo e evitar os impactos negativos de obras rígidas.⁷⁷ Apenas na Comunidade Valenciana, no leste do país, 29 intervenções como essas foram feitas entre 1985 e 1999 por se considerar a opção mais ambientalmente amigável.

Em Portugal, na costa da Caparica⁷⁸, **a retração de 3 km de um pontal arenoso entre 1929 e 1957 promoveu a erosão irreversível do sistema praia-duna**. No período entre 1959-1972 a resposta foi a de construir obras rígidas do tipo paredão (*seawall*) e um campo de 7 espigões, cada um com 180m de comprimento. Entre 1972-2000 a linha de costa se manteve estável apesar de alguns eventos localizados de erosão durante tempestades de inverno. Daí em diante verificou-se que a erosão costeira continuaria e que

⁷⁶ STIVE, M.J.F.; SCHIPPER, M.A.; LUIJENDIJK, A.P.; AARNINKHOF, S.G.J.; van GELDER-MAAS, C.; VRIES, J.S.M.T.; VRIES, S.; HENRIQUEZ, M.; MARX, S.; RANASINGHE, R. A new alternative to saving our beaches from sea-level rise: the Sand Engine. *Journal of Coastal Research*, v. 29, n. 5. p. 1001-1008, 2013.

⁷⁷ ARAGONES, L.; GARCIA-BARBA, J.; GARCIA-BLEDA, E.; LOPEZ, I.; SERRA, J.C. Beach nourishment impact on *Posidonia oceanica*: Case study of Poniente Beach (Benidorm, Spain). *Oceano Engineering*, v. 107, n.1, p. 1-12, 2015.

⁷⁸ VELOSO-GOMES, F.; COSTA, J.; RODRIGUES, A.; TAVEIRA-PINTO, F.; PAIS-BARBOSA, J.; NEVES, L. Costa da Caparica artificial sand nourishment and coastal dynamics. *Journal of Coastal Research*, SI56, p. 678-682, 2009

as estruturas existentes deveriam ser reparadas. Decidiu-se pela alimentação artificial do sistema praia-duna utilizando-se 3 milhões de m³ de areia extraídas de um canal de navegação próximo e pela recuperação dos espigões e dos paredões. Dunas artificiais foram construídas onde não existiam paredões. A autoridade de gerenciamento costeiro espera poder retirar 3 dos espigões no próximos anos e **o sucesso das intervenções conciliou estruturas rígidas, recuperação artificial do sistema praia-duna e planejamento urbano.**

Na Alemanha, atualmente, **as políticas de gerenciamento costeiro identificam a proteção à natureza como um componente integral dos projetos dimensionados para a proteção dos usos humanos na costa**, depois de séculos de utilização de estruturas rígidas⁷⁹. Os gestores estão reavaliando o desejo de estabilizar o litoral e considerando as formas de manter a costa mais móvel e preferindo **realçar as transferências de sedimentos entre áreas de acumulação e erosão**, reiniciar a sucessão ecológica para **aumentar a biodiversidade** e retornar áreas desenvolvidas para uma condição mais natural. Na prática existe a preferência na utilização de materiais naturais como rochas, areias, solo e madeira nas estruturas de defesa do litoral e deve-se considerar a relação mútua entre parâmetros e aspectos fisiográficos (paisagem), ecológicos e econômicos.

No Japão, na costa de Hasaki, no leste do país, 50 milhões de m³ de areia foram injetados na praia entre 1965 e 1977, resultantes das operações de dragagem portuária. Boa parte desse “aterro” virou terra habitável e cerca da metade virou praia que se ajustou à dinâmica costeira. Em 2013, apesar da sequência decadal de eventos de erosão e acumulação, foi verificado que a posição média da praia avançou 70 metros quando comparada ao ano de 1961.⁸⁰

O maior benefício dos projetos de alimentação artificial de praias e criação de dunas artificiais é que, à despeito das estruturas rígidas, **as dunas dissipam a energia das ondas e não apenas as refletem de volta à praia**. As dunas frontais, sejam naturais (Figura 28) ou artificiais, promovem uma **barreira física entre o mar e as áreas continentais**. Essa barreira pode movimentar-se naturalmente durante eventos de maior energia. Quando as ondas atingem as dunas e promovem sua movimentação a energia da onda foi absorvida

⁷⁹ NORDSTROM, K.F.; LAMPE, R.; JACKSON, N.L. Increasing the dynamism of coastal landforms by modifying shore protection methods: examples from the eastern German Baltic Sea Coast. *Environmental Conservation*, v. 34, n. 3, p. 205-214, 2007

⁸⁰ BANNO, M.; TAKEWAKA, S. Multidecadal shoreline evolution due to large-scale beach nourishment in Japan. *American Geophysical Union, Fall General Assembly 2016*, abstract id. EP23A-0942

pelas areias e não refletida nas áreas construídas à retaguarda. A altura, a largura e comprimento da duna artificial vai determinar o nível de proteção exercida.⁸¹



Figura 28. Vista aérea do alinhamento de dunas frontais em Atafona. Em destaque, na porção inferior da imagem, as áreas naturalmente protegidas pelas dunas frontais naturais. No segmento em erosão, na porção superior da imagem, destacam-se áreas onde as dunas foram ocupadas ou suprimidas. A idéia da restauração do sistema praia-duna com a construção de bermas e dunas artificiais visa recompor as condições naturais do entorno. Foto: Thiago Pereira

Dunas artificiais ou dunas recuperadas não apenas aumentam o nível direto de proteção à costa como ainda recuperam a capacidade de proteção de todo o sistema praia-duna na medida em que a areia movimentada das dunas não é perdida e sim adicionada à praia e ao entorno formando bermas, terraços e bancos de areia, junto à praia ou submersas (Figura 29), que possibilitam melhor dissipação de energia das ondas.

Os impactos negativos dos projetos de recomposição/construção de dunas são relativamente menores quando comparados às estruturas rígidas e **ocorrem quando são construídas dunas muito íngremes ou com areias incompatíveis.** Dunas muito

⁸¹ STORM SMART PROPERTIES FACT SHEET 1.

<https://www.mass.gov/service-details/stormsmart-properties-fact-sheet-1-artificial-dunes-and-dune-nourishment>

Íngremes podem colapsar rapidamente, podem **impedir a locomoção da fauna terrestre e reduzir a acessibilidade dos usuários**. Quanto às areias, se as mesmas forem menores que as nativas elas podem ser perdidas rapidamente pela ação de ventos e ondas. Se as areias forem muito maiores podem agir refletindo a ação das ondas e formando escarpas elevadas o que inviabiliza uma praia recreativa e acessível. A compatibilidade dos materiais a serem usados nos projetos de recuperação artificial do sistema-praia duna deve considerar os aspectos de tamanho, forma, cor e textura.

Por fim, uma observação importante a ser assumida é que os **projetos de defesa do litoral usualmente combatem os “sintomas” e não as “causas” da erosão costeira**. No entanto, **a não ocupação/imobilização por estruturas urbanas de qualquer natureza do sistema praia-duna construído ou recuperado** garante o seu funcionamento pleno como **linha de defesa do litoral** e isso evita avanços do mar sobre as estruturas já instaladas.

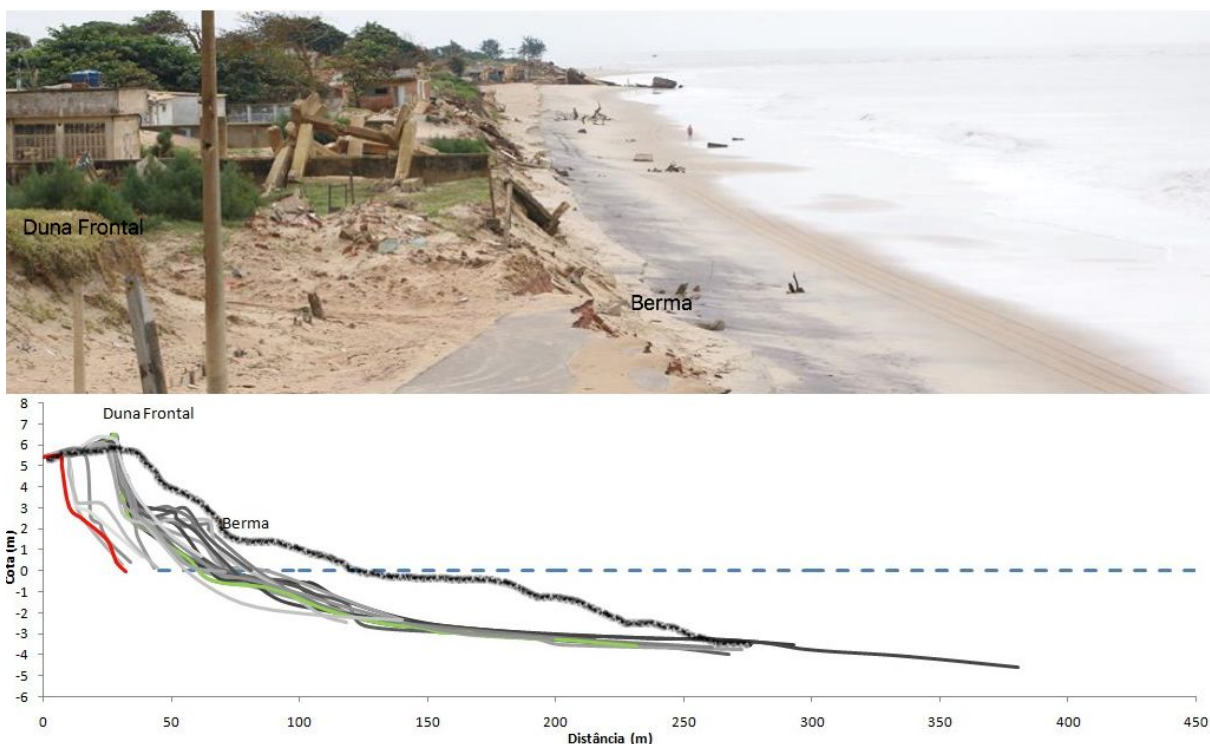


Figura 29. Croqui em perfil da proposta de alimentação artificial do sistema praia-duna. Todas as linhas sólidas do gráfico representam um levantamento de perfil de praia executado pelo Laboratório de Geografia Física da UFF nas proximidades da caixa d'água da CEDAE hoje desativada conforme a foto acima. No gráfico a linha em vermelho representa um levantamento de 2009. A linha em verde representa o primeiro levantamento em 2004. A linha pontilhada representa o nível do mar. A linha jateada foi desenhada aleatoriamente e representaria a recomposição do perfil com a alimentação artificial da berma e da duna frontal.

Recomendações Técnicas Básicas para o Projeto de Alimentação Artificial do Sistema Praia-Duna de Atafona

Visando uma condição ótima e o **objetivo claro de combater a erosão costeira crônica** e de interromper as perdas de propriedades na área urbanizada de Atafona, pelo menor custo de intervenção na costa, para a construção de uma proposta executiva do projeto é necessário verificar alguns passos a serem consultados por um especialista habilitado⁸² a projetar essas intervenções. Destacam-se inicialmente alguns pontos:

- Consultar a legislação e aos órgãos ambientais, na esfera federal e estadual, para as etapas do licenciamento ambiental das intervenções;
- Estimar as “perdas de areia” em m³/ano com base em levantamentos no sistema praia-duna, idealmente com a utilização de dados de monitoramento;
- Estimar outros “fatores de perda” de areias durante a execução das intervenções;
- Determinar das áreas de empréstimo mais próximas (distância da área de empréstimo é crucial para os custos) e da compatibilidade entre as areias da área de empréstimo com as areias nativas;
- Determinar da melhor época do ano para a intervenção baseado em informações ambientais (vazão, chuvas, ventos, ondas, etc);
- Determinar os métodos e equipamentos disponíveis para dragagem e bombeamento de areias;
- Determinar os métodos e equipamentos disponíveis para o espalhamento mecânico e construção das dunas artificiais (incluindo plantio de vegetação, cercamento de dunas e estruturas de acessibilidade);
- Determinar os critérios para o design das dunas artificiais com base na forma das dunas frontais vegetadas existentes;
- Determinar os métodos para contenção de areias nas dunas visando espessamento vertical e estabilização (cercas; vegetação; etc);
- Determinação das melhores estratégias de monitoramento durante e pós-intervenções;
- Determinação das melhores estratégias, baseadas no tempo, para re-alimentação o sistema praia duna;
- Estimar impactos ambientais positivos e negativos;
- Estimar custos em razão das etapas descritas anteriormente.

⁸² geólogos, geógrafos e engenheiros especializados em processos costeiros e litorâneos são habilitados pelo sistema CONFEA/CREA para tais atribuições;

Recomendações Finais

Recentemente (março de 2018) o governo federal brasileiro através do Ministério do Meio Ambiente lançou o projeto **PROCOSTA**⁸³ que prevê uma série de subprojetos, dentre eles, o de Monitoramento e Gestão para a Conservação da Linha de Costa no qual **as regiões costeiras terão a possibilidade de transformar seus ambientes costeiros que cumprem a função de proteção natural (dunas, restingas, manguezais, recifes de coral) em ativos econômicos, sociais e ambientais** dentro de algum tipo de mecanismo (ainda não determinado) de valoração e pagamento a ser trabalhado entre os três níveis de governo (federal, estadual e municipal). As oportunidades no âmbito federal de **conservação dos ecossistemas costeiros numa escala de tempo de 5 a 100 anos deverão ser acompanhadas de mecanismos de incentivo** aos estados e municípios com estes ativos ambientais.

Na perspectiva de auxiliar à municipalidade na resolução dos problemas de erosão costeira que afetam a área de Atafona, são aqui listadas algumas recomendações que julgo importantes já consoantes com essa nova perspectiva.

- A **retomada definitiva e imediata das atividades do Projeto Orla**⁸⁴ municipal, em consonância com o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro⁸⁵, e o cumprimento de suas etapas com a homologação do Plano de Gestão Integrada e homologação do Comitê Gestor da orla do município garantiria o **compromisso de gestão participativa da orla** envolvendo as esferas de governo federal, estadual, municipal e a sociedade civil organizada, **o que tornaria participativa, legítima e consolidada as tomadas de decisão sobre as intervenções para a orla de Atafona;**
- A construção do consenso ou a adesão da maioria da opinião pública em concordar e defender que a adoção de **alternativas para defesa do litoral devem estar baseadas na recuperação ambiental e na restauração dos habitats** de forma que os **serviços ambientais sejam restabelecidos** em detrimento ao comprometimento dos valores estéticos paisagísticos do balneário, da perda de qualidade ambiental e da transposição da erosão costeira para outras áreas do litoral sanjoanense;
- Em termos ideais, seria importante **vincular fontes de recursos para manutenção periódica das ações de defesa do litoral** uma vez que a continuidade das intervenções de recuperação do sistema praia-duna são necessárias e pressupõem também a contratação de serviços de monitoramento e fiscalização;

⁸³ [Programa Nacional para Conservação da Linha de Costa.](#)

⁸⁴ Projeto de Gestão Integrada da Orla Marítima. O Projeto de Gestão Integrada da Orla Marítima – Projeto Orla, surge como uma ação inovadora no âmbito do Governo Federal, conduzida pelo Ministério do Meio Ambiente, por meio da Secretaria de Qualidade Ambiental nos Assentamentos Humanos, e pela Secretaria do Patrimônio da União do Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, buscando implementar uma política nacional que harmonize e articule as práticas patrimoniais e ambientais, com o planejamento de uso e ocupação desse espaço que constitui a sustentação natural e econômica da Zona Costeira.

⁸⁵ Lei Federal no. 7.661 de 16 de maio de 1988 e Decreto no. 5.300 de 7 de dezembro de 2004

- **Criação de unidade de conservação de uso sustentável** (ex. APA “Dunas de Atafona”) e elaboração de plano de manejo que conste o **zoneamento que permita proteção efetiva** à faixa ativa do sistema praia-duna sobretudo **às dunas frontais** naturais e/ou construídas (ex. cercamento), para evitar o trânsito de veículos *off-road* e outros usos que comprometam a estabilidade do sistema dunar;
- Na medida que as dunas (naturais e/ou construídas) sejam protegidas, viabilizar a **construção de estruturas leves sobre as dunas frontais** (ex. passarelas suspensas) para garantir a acessibilidade de pessoas ao mar.

Desde já à disposição para demais esclarecimentos,

Cordialmente,

Prof. Dr. Eduardo Manuel Rosa Bulhões

Chefe do Departamento de Geografia
GeoCosteira - Unidade de Estudos Costeiros
Instituto de Ciências da Sociedade e Desenvolvimento Regional
Universidade Federal Fluminense
CREA RJ 2014200192
bulhoes.e@gmail.com