Revista da ANPEGE. v. 17. nº. 33, p. 162 - 182, ANO 2021. e-ISSN: 1679-768X
https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/anpege. // DOI 10.5418 / ra2021.v17i33.11946

DINÂMICA EROSIVA E PROGRADACIONAL DAS PRAIAS DE ATAFONA E GRUSSAÍ (RJ), 1954-2019

EROSIVE AND PROGRADING BEACHE DYNAMICS OF ATAFONA AND GRUSSAÍ (RJ), 1954-2019

DINÁMICA EROSIVA Y DE PROGRADACIONAL DE LAS PLAYAS DE ATAFONA Y GRUSSAÍ (RJ), 1954-2019

Sérgio Cadena de Vasconcelos | Isabelle Afonso Ramos | Rafael da Silva Nunes | Ricardo Alvares dos Santos | Alberto Garcia de Figueiredo Jr.

RESUMO

O trabalho realizou mapeamento e análise multitemporal dos processos de erosão e progradação nas praias de Atafona e Grussaí (RJ), a partir de séries temporais de imagens de 1954-2019. Resultados mostraram Atafona com tendência erosiva, enquanto Grussaí sofre progradação. A intensidade dos fenômenos classifica Atafona como erosão extrema. A área total erodida foi de 1.031.238,59 m² e a de progradação 687.147,77 m². A taxa média linear de erosão foi de 164 m (máximo de 289m), já a progradação ficou em 166 m (máximo de 226m). Cálculos de velocidade média indicam erosão de 2,54 m.ano^{-1} e progradação de 2,56 m.ano^{-1}. Os dados reafirmam a importância da deriva litorânea na evolução do litoral, transportando sedimentos entre Atafona e Grussaí, e mostraram que os processos não ocorrem de forma contínua e nem com a mesma intensidade ao longo do tempo. Ocasionalmente há predomínio de uma única dinâmica ao longo de toda a costa.

Palavras chaves: Erosão; Progradação; Atafona; Grussaí; Detecção de Mudanças.

ABSTRACT

The work carried out mapping and multitemporal analysis of the erosion and progradation processes on the beaches of Atafona and Grussaí (RJ), based on time series of images from 1954-2019. Results showed Atafona with an erosive tendency, while Grussaí undergoes progradation. The intensity of the phenomena classifies Atafona as extreme erosion. The total eroded area was 1,031,238.59 m² and the progradation area was 687,147.77 m². The average linear erosion rate was 164 m (maximum 289 m), while the spread was 166 m (maximum 226 m). Average speed calculations indicate erosion of 2.54 m.year-1 and progradation of 2.56 m.year-1. The data reaffirm the importance of coastal drift in the evolution of the coast, transporting sediments between Atafona and Grussaí, and showed that the processes do not occur continuously or with the same intensity over time. Occasionally there is a predominance of a single dynamic along the entire coast.

Keywords: *Erosion; Progradation; Atafona; Grussaí; Detection of shoreline changes.*

RESUMEN

El trabajo realizó el mapeo y análisis multitemporal de los procesos de erosión y progradación en las playas de Atafona y Grussaí (RJ), a partir de series temporales de imágenes de 1954-2019. Los resultados mostraron que Atafona tiene una tendencia erosiva, mientras que Grussaí sufre una progradación. La intensidad de los fenómenos clasifica a Atafona como extrema erosión. El área total erosionada fue de 1.031.238,59 m² y el área de progradación fue de 687.147,77 m². La tasa de erosión lineal promedio fue de 164 m (máximo 289 m), mientras que la extensión fue de 166 m (máximo 226 m). Los cálculos de velocidad media indican una erosión de 2,54 m. Año-1 y una progradación de 2,56 m. Año-1. Los datos reafirman la importancia de la deriva costera en la evolución del litoral, transportando sedimentos entre Atafona y Grussaí, y mostraron que los procesos no ocurren de forma continua ni con la misma intensidad en el tiempo. De vez en cuando hay un predominio de una dinámica única a lo largo de toda la costa.

Palabras clave: Erosión; Progradación Atafona; Grussaí; Detección de cambio.

Introdução e Área de Estudo

Um dos principais problemas encontrados na zona costeira em todo o mundo são as consequências em decorrência do fenômeno da erosão (BIRD, 1985; SOUZA *et al.* 2005; MUEHE, 2006; SOUZA, 2009), sendo um dos seus reflexos mais expressivos a perda de áreas recreativas e edificadas devido ao recuo da linha de costa. Para Dias e Silva (2003), o recuo do litoral em direção ao continente apresenta-se como um processo natural que apenas se torna um problema quando estruturas permanentes são construídas em áreas propensas a erosão ou do impacto direto das ondas. Neste sentido, a zona costeira apresenta-se como um ambiente vulnerável a alguns fenômenos associados a dinâmica litorânea, como processos de erosão e deposição, ventos intensos, marés meteorológicas, inundações, entre outros (MAZZER *et al*., 2008).

No entanto, segundo apontado por Muehe (2005), a identificação das causas da erosão costeira tem sido frequentemente um "exercício de adivinhação" em decorrência da falta de informações sobre a tendência de variação do nível do mar, do clima de ondas e da própria evolução da linha de costa ao longo dos anos. Consequentemente, torna-se difícil diferenciar episódios erosivos e progradantes de tendências regionais de longo prazo e tal diferenciação carece de monitoramento e observações de longo prazo sobre os processos observados ao longo da linha de costa (MUEHE, 2005).

Dentre os ambientes costeiros do litoral norte fluminense, a planície costeira holocênica associada ao rio Paraíba do Sul possui certo destaque e tem sido tradicionalmente objeto de pesquisas científicas (DIAS, 1981; BASTOS, 1997; AZEVEDO, 2004; SANTOS, 2006; FERNANDEZ *et al*., 2008; ROCHA *et al.* 2013; VASCONCELOS, 2010; VASCONCELOS *et al*., 2016; MUEHE *et al*., 2018 e ROCHA *et al*., 2018). No entanto, apesar do caráter progradante de sua planície, a região da praia de Atafona vem sofrendo com o fenômeno de erosão costeira já há algumas décadas.

Esta pesquisa visa auxiliar a compreensão da dinâmica costeira na planície ao sul do rio Paraíba do Sul, a partir do melhor entendimento dos fenômenos atuantes na linha de costa. Tais informações constituem importantes ferramentas para os gestores municipais visando traçar estratégias de planejamento, ocupação e usos múltiplos do litoral, tanto nos trechos sob domínio do processo erosivo, quando naqueles em franco processo progradacional. Assim, o principal objetivo desta pesquisa é caracterizar a dinâmica erosiva e progradacional no trecho do litoral compreendido entre as praias de Atafona e Grussaí no município de São João da Barra, litoral norte fluminense, dando continuidade aos trabalhos que vem sendo desenvolvidos na região (figura 1).

A área de estudo possui características de clima tropical úmido (COSTA, 1994), marcada por um período chuvoso no verão e uma estação seca no inverno. Segundo Pinho (2003), a região está sobre a influência da célula de Alta Pressão do Atlântico Sul fazendo com que predominem ventos do quadrante NE com velocidades médias variando entre 2,6 e 5,0 $m.s^{-1}$. Ainda segundo o autor, em decorrência da passagem de frentes frias principalmente durante o inverno, ventos dos quadrantes S, SE e até mesmo SW também podem atingir a região.

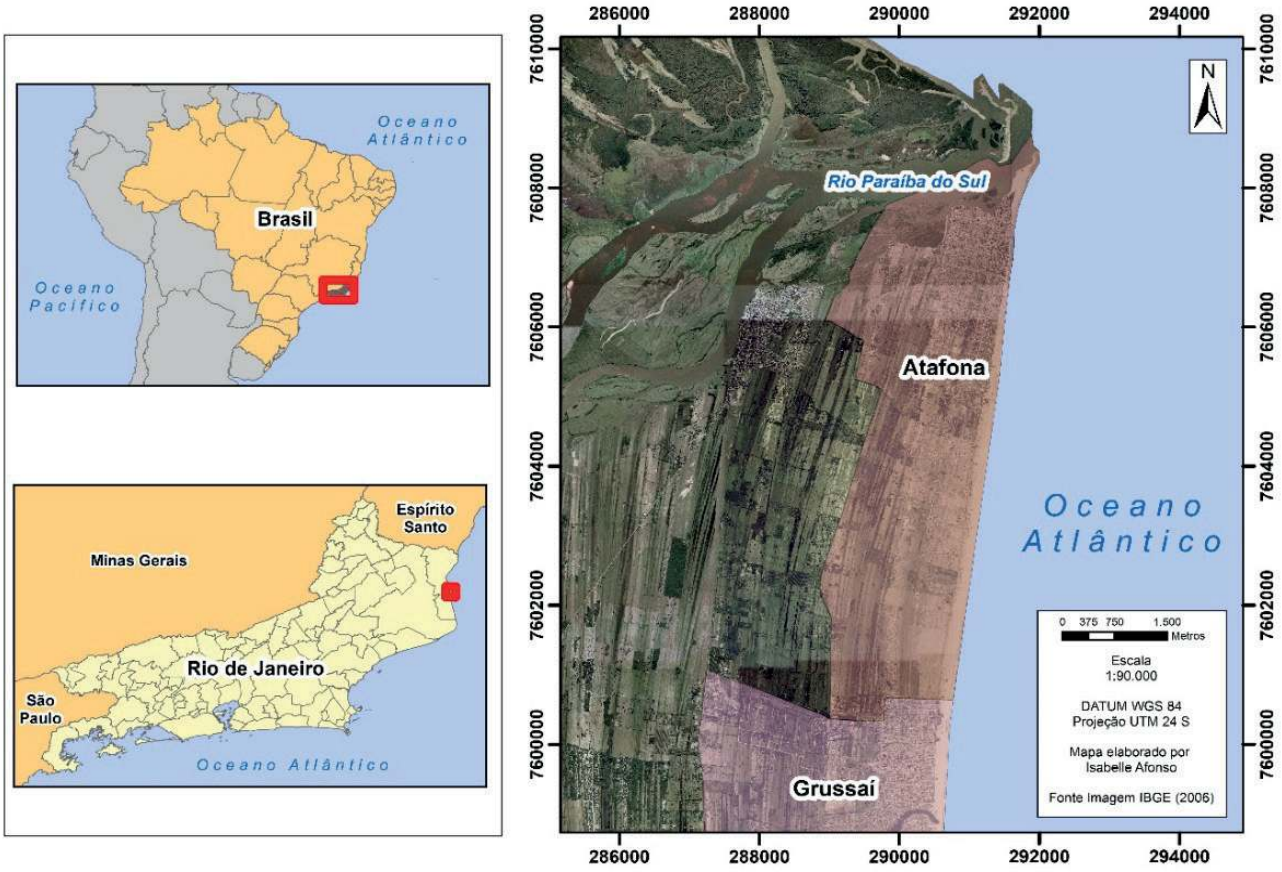

Fig. 1 – Mapa de localização da área de estudo com destaque para os distritos de Atafona e Grussaí. A área de estudo engloba um trecho de aproximadamente 10 quilômetros de litoral.

Vasconcelos *et al.* (2016), a partir de dados gerados pelo modelo WAN para a Bacia de Campos, descrevem a ocorrência de ondas com direção de propagação de pico de NE e SE associadas a ocorrência dos ventos locais e daqueles relacionados aos sistemas frontais. Tais características de ondas também foram observadas por SOUZA (2011) ao analisar dados de ondas obtidos entre 2005 e 2011. Neste litoral as ondas desempenham um papel importante na evolução deltaica sendo este caracterizado como dominado por ondas. A região também é marcada por uma amplitude de maré que pode chegar até 1,3m na maré de sizígia, classificando o litoral como sujeito a micro maré.

Outro aspecto importante a ser destacado na evolução da planície deltaica é a atuação da deriva litorânea. Dias e Gorini (1980), Cassar e Neves (1993) e Machado (2009) apontaram o sentido N-S, a partir da foz, como o predominante na região da área de estudo. Recentemente, Vasconcelos *et al.* (2016) reafirmam os dados encontrados por estes autores ao calcular o transporte residual a partir da reconstituição do clima de ondas entre 2004 e 2007.

A área de estudo é marcada por uma geomorfologia composta pela sucessão de cristas e cavas formando uma extensa planície costeira progradante de idade holocênica construída a partir da tendência de rebaixamento do nível do mar nos últimos 5.000 anos e de um contínuo aporte de sedimentos de origem fluvial. No interior da planície é possível observar a existência de discordâncias na orientação dos feixes de cristas de praia, bem como a presença de paleodunas preservadas, registros pretéritos da ocorrência de eventos erosivos ao longo de sua evolução (DOMINGUEZ *et al.* 1981; SILVA, 1987; MARTIN *et al.*, 1997; BASTOS, 1997; ALMEIDA *et al.*, 2005, ÂNGULO *et al.* 2006, VASCONCELOS, 2010 e ROCHA *et al.* 2018). A presença destes registros demonstra que o processo erosivo é algo natural, e até recorrente ao longo da evolução da planície, contudo pode estar sendo intensificado atualmente pelas atividades humanas ao longo da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul.

Desde a década de 1950 a região vem experimentando fases erosivas (figura 2) que já causaram a perda de mais de 14 quadras de ruas, e quase 200 construções no distrito de Atafona (AZEVEDO, 2004 e SANTOS, 2006). Fernandez *et al.* (2008) e Rocha *et al.* (2018) apontam ainda que a erosão acaba por disponibilizar sedimentos que, sobre a atuação intensa dos ventos de NE locais, levou ao desenvolvimento vertical de dunas e sua migração sobre as edificações. Neste contexto, o acompanhamento e detalhamento desta dinâmica apresenta-se como informação fundamental para a melhor compreensão do fenômeno atualmente em curso, apresentando subsídios importantes para a gestão e mitigação de impactos.



Fig. 2 – Fotos retratando a intensidade do processo erosivo em dois trechos da praia de Atafona. A esquerda foto de 2004 (acervo pessoal dos autores), a direita 2015 (foto de Elder Amaral).

Materiais e Métodos

A metodologia aplicada neste trabalho possui o propósito de caracterizar e avaliar os processos de dinâmica costeira, tendo como base procedimentos utilizados por Santos (2006); Vasconcelos (2010), e Klein *et al.* (2016). Essencialmente a coleta, análise e interpretação dos dados envolveu três etapas distintas: a reunião de séries históricas de imagens, aquisição de dados de ventos e geoprocessamento.

Séries históricas de imagens

A reunião de séries históricas de imagens teve o propósito de apresentar um histórico evolutivo da dinâmica costeira, mediante a comparação das posições das linhas de costa para épocas diferentes, assim como de delimitar o trecho de ocorrência dos processos de erosão e progradação, bem como quantificar a área erodida ou de acúmulo de sedimento ao longo dos anos.

Para a delimitação da linha de costa sobre as imagens, foi utilizado como indicador visualmente discernível a linha formada pelo espraiamento máximo das ondas, também conhecida como o contato entre a zona seca e a zona úmida da praia (BOAK e TUNER, 2005). Embora este indicador seja suscetível às variações das marés e do tipo morfodinâmico da praia (MUEHE e KLUMB-OLIVEIRA, 2014), ele foi escolhido pelo fato de que outros elementos fisiográficos como o limite da vegetação e/ou escarpa da duna frontal (limites de pós-praia) foram de difícil identificação, principalmente nas fotografias aéreas mais antigas. Tais comparações também permitiram calcular as taxas médias de variação linear e a velocidade média dos fenômenos mapeados.

A reunião de fotografias e imagens de épocas distintas permitiu acompanhar a evolução da configuração da linha de costa nos últimos 65 anos. As onze imagens que compõe a série histórica utilizada nesta pesquisa têm suas especificações apresentadas na tabela 1.

Tabela 1 – Relação de imagens utilizadas para compor a série histórica.

Data	Órgão	Especificações
1954	Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil (DHN)	Três fotografias aéreas em escala de 1:30.000;
1964	U. S. Air Force (USAF)	Duas fotografias aéreas, em escala de 1:60.000;
1974	Disponibilizadas pelo IBGE originadas pela Força Aérea Brasileira (FAB)	Duas fotografias aéreas em escala de 1:30.000;
1976	Disponibilizadas pelo Departamento de Recursos Minerais (DRM) originadas pela FAB	Três fotografias aéreas em escala de 1:20.000;
2000	Disponibilizado pela Ampla, atual Enel (concessionária de energia que atende grande parte do estado do RJ)	Ortomosaico em escala de 1:30.000
2005	Projeto RJ25 do IBGE	Ortomosaico com escala de 1:30.000 e com resolução de 1 metro;
2007	Satélite japonês ALOS, fornecida pelo IBGE	Uma imagem de satélite, monocromática, com resolução espacial de 2,5m;
2008	Satélite japonês ALOS, fornecida pelo IBGE	Uma imagem de satélite, monocromática, com resolução espacial de 2,5m;
2016 (30.08.2016)	Disponibilizadas através da plataforma Google Earth Pro	Quatro imagens de satélite oriundas da Digital Globe;
2017 (03.05.2017)	Disponibilizadas através da plataforma Google Earth Pro	Oito imagens de satélite oriundas da Digital Globe;
2019 (05.04.2019)	Disponibilizadas através da plataforma Google Earth Pro	Cinco imagens de satélite oriundas da CNES/ Airbus.

Geoprocessamento e detecção de mudanças do litoral

O uso do geoprocessamento apresenta-se como uma ferramenta de extrema importância para realização de análises espaciais, visto que permitem a aquisição de dados e possibilitam uma análise mais ampla do objeto de estudo, tanto em escala regional quanto em escala local. Conforme exposto por Câmara e Davis (2001), denota a utilização de "técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica" (pág. 1), sendo passível, portanto, de aplicações em múltiplas áreas do conhecimento. De acordo com os autores, tais técnicas materializam-se em conjuntos de ferramentas intitulados Sistemas de Informações Geográficas (SIG) que permitem a manipulação e análise de informações espaciais a partir de bancos de dados georreferenciados. Desta forma, adotou-se o *software* ArcGIS versão 10.5, através do qual as imagens foram georreferenciadas por pontos notáveis tendo como imagem de referência o ortomosaico de 2005 do IBGE com resolução espacial de 1m.

Após a etapa de georreferenciamento, as imagens foram mosaicadas, formando assim uma única imagem para cada época analisada, sobre as quais foram vetorizadas as linhas de costa. Os vetores no formato linha foram comparados entre si por meio de sobreposição para a observação do comportamento dinâmico nas últimas décadas.

Foram gerados polígonos entre as linhas vetorizadas o que permitiu identificar o processo em curso ao longo do período analisado, tornando-se possível quantificar a área total

envolvida em cada processo comparativo. O mesmo processo foi elaborado levando em consideração cada uma das imagens, possibilitando o acompanhamento da transformação da paisagem em diferentes intervalos de tempo. Desta forma, elaboraram-se produtos cartográficos que expressavam espacialmente o fenômeno analisado.

Para quantificar a taxa média de variação linear dos processos de erosão e progradação, após a conclusão dos mapas comparativos, foi traçada uma reta paralela à linha de costa ao longo de toda a extensão do litoral em estudo (cerca de 10 km), definindo-se seu eixo a partir da interseção no ponto de inflexão entre a dinâmica erosiva e progradacional. Desta maneira, foi possível estabelecer pontos fixos de medições transversais a costa, que equidistavam 50 metros entre si. Medindo a variação linear em cada um destes pontos, dividido pelo número de medições realizadas se obteve a taxa média de recuo, ou avanço da linha de costa para o período comparado. Este valor obtido dividido pelo número de anos entre as imagens analisadas forneceu a velocidade média dos processos em metros por ano. Todas as medições e cálculos foram feitos de forma automática utilizando as ferramentas do próprio *software*.

Dados ambientais de ventos

Buscando auxiliar na interpretação dos resultados, foram utilizados dados históricos de ventos já disponíveis no grupo de pesquisa, reunidos junto a Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) da Marinha do Brasil.

Os dados de ventos são correspondentes ao período entre 1956 e 2001. Inicialmente os dados brutos estavam contidos em uma tabela única, com leituras diárias realizadas duas vezes ao dia entre 1956 e 1968 e quatro vezes ao dia entre 1968 e 2001. Os dados foram organizados por ano e por hora, sendo criado, para cada ano, uma tabela com os registros diários de um único horário (12:00h, único presente em todos os dias ao longo dos anos). Dados obtidos entre os anos de 1956 e 1963 foram descartados pois os registros não eram contínuos, existindo vários meses sem nenhum tipo de informação. Os registros de ventos foram separados por direção e intensidade ao longo do ano e calculadas as médias com o auxílio do software *Excel for Windows*.

Resultados e discussões:

Os dados desta pesquisa permitiram o melhor entendimento dos fenômenos de erosão e progradação em curso nos últimos 65 anos. Segundo Muehe (2005), o monitoramento e observações de longo prazo sobre os processos observados ao longo da linha de costa são fundamentais para diferenciar episódios, de tendências regionais de longo prazo. Nesse sentido, com os dados coletados, foi possível consolidar informações referentes ao tamanho de áreas erodidas e progradadas, taxas médias de variação linear da linha de costa e velocidades médias destes processos (tabela 2 e figura 3).

A partir da análise realizada sobre imagens dos extremos do recorte temporal observado (1954 e 2019), foi possível identificar dois setores com tendência de comportamento dinâmico distintos. Um localizado mais ao norte, nas proximidades do distrito de Atafona (junto à foz do rio Paraíba do Sul), onde se observa o predomínio do recuo da linha de costa em direção ao continente e o estabelecimento de um intenso processo erosivo nas últimas décadas, e outro, mais ao sul no distrito de Grussaí, onde um franco processo de acreção sedimentar se reflete na progradação da praia.

A caracterização desta tendência geral está coerente e corrobora os estudos anteriormente realizados na região (BASTOS, 1997; BASTOS e SILVA, 2000; RIBEIRO *et al.* 2005; SANTOS, 2006, LUIJENDIJK *et al.*, 2018 e ROCHA *et al.* 2018). Contudo, alguns dados diferem em relação a outros trabalhos principalmente no que se refere aos valores de mobilidade

encontrados. Acredita-se que a maior precisão no georreferenciamento das imagens, utilizando como referência imagem ortorretificada e de alta resolução espacial, bem como a maior acurácia no procedimento de vetorização das feições, realizado em escala de 1:5000, somado a cálculos e medições com o auxílio de ferramenta de medição automática em ambiente de SIG possam ter dado mais robustez aos dados encontrados por este trabalho.

Nas últimas seis décadas e meia, o processo de retrogradação foi responsável por erodir uma área de 1.031.238,59 m². Já o trecho em progradação representou a acreção de uma área corresponde a 687.147,77 m². A taxa média de variação linear associada à erosão para o período ficou em 164,97 m, enquanto que a de progradação foi de 166,66 m. Embora os valores médios já indiquem o estabelecimento de processos bastante intensos, a análise da variação linear máxima mostra que, em alguns pontos do litoral, os valores de recuo da linha de costa chegaram a atingir 289 m, enquanto que os de progradação alcançaram até 226 m (tabela 3). Para o período analisado foi calculada ainda uma velocidade média de erosão de 2,54 $m.ano^{-1}$ e 2,56 $m.ano^{-1}$ de progradação.

A magnitude do evento erosivo mapeado em Atafona coloca esta praia como uma das praias arenosas com processos erosivos mais expressivos no Brasil. Segundo recente trabalho publicado por Luijendijk *et al.* (2018), os valores da dinâmica erosiva medidos em Atafona classificam esse trecho do litoral fluminense como sujeito a erosão extrema. Para os autores, litorais com a ocorrência de taxas de recuo da linha de costa superiores a 5 m/ano se enquadrariam nesta classificação, compondo um grupo que representa algo em torno de 4% do conjunto global de praias arenosas. Embora a velocidade média de erosão para todo o período tenha ficado em torno de 2,5 $m.ano^{-1}$, análises mais detalhadas realizadas em intervalos de tempo menores demostram que estes valores, por diversas vezes, superaram e muito os 5 $m.ano^{-1}$ (tabela 2).

Muehe (2005) aponta que no litoral brasileiro problemas de erosão costeira têm sido frequentemente associado à expansão urbana sobre a praia, o que acaba por imobilizar faixas arenosas ainda ativas pela atuação de forçantes como ondas, correntes e marés. Tal cenário é a realidade de Atafona onde a urbanização avançou sobre uma área extremamente dinâmica associada a foz do rio Paraíba do Sul (BULHÕES, 2018).

Já o aumento da largura da praia em Grussaí (com valores máximos de até 226 m) não ameaça estruturas nem causa riscos à população, no entanto influencia principalmente o uso recreativo do litoral. É comum a presença de plataformas suspensas construídas pela prefeitura que ligam o polo gastronômico local, estacionamentos e o calçadão até áreas da praia mais próximas a água, uma tentativa de facilitar o acesso e aproximar banhistas e comerciantes.

Esse comportamento dinâmico marcado pelo recuo da linha de costa em Atafona e o simultâneo avanço na direção do mar que ocorre em Grussaí, reafirmam a importância do papel da deriva litorânea no transporte longitudinal de sedimentos e na evolução deste trecho do litoral norte fluminense. Os sedimentos remobilizados pela erosão em Atafona são transportados prioritariamente no sentido N-S, como já afirmavam Cassar e Neves (1993), Gonçalves e Silva (2005), Machado (2009), Vasconcelos *et al.* (2016) e Rocha *et al.* (2018), sendo depositados ao longo da praia de Grussaí. É comum observar pequenos fragmentos de material de construção como tijolos e azulejos junto a face de praia, indicando que este material originado das casas demolidas pela erosão em Atafona teria sido transportado da mesma forma que as areias ao longo da costa.

O processo erosivo descrito para Atafona já fica evidenciado no recorte temporal mais antigo entre 1954 e 1964, indicando que seu início do fenômeno tenha provavelmente ocorrido a partir da década de 1950. Tais registros coincidem com a data dos primeiros relatos na imprensa local sobre danos a estruturas e casas construídas próximo à praia de Atafona e na Ilha da Convivência, na foz do rio Paraíba do Sul (NORONHA, 2003; RIBEIRO *et al.*, 2005 e NORONHA, 2007).

Embora o comportamento observado nesses dois setores reflita uma tendência geral, a análise entre menores intervalos de tempo permitiu identificar que os processos não

ocorrem de forma contínua e nem com a mesma intensidade ao longo do tempo. Foi possível observar que em alguns momentos as taxas médias de variação linear, assim como as velocidades médias dos processos variaram dependendo da época investigada. É possível que estas variações possam estar relacionadas às mudanças na dinâmica climática, oceanográfica e hidrodinâmica do rio Paraíba do Sul.

Também é possível notar que em alguns períodos, a divisão do litoral em dois setores com comportamentos dinâmicos distintos é substituída ocasionalmente pelo predomínio de um único comportamento morfodinâmico ao longo de toda a costa. Santos (2006), a partir de observações sobre fotografias aéreas entre 1964, 1974 e 1976, já havia identificado esse comportamento. Com a expansão do intervalo de observação até 2019 foi possível identificar que o fenômeno é recorrente e está presente também nas observações realizadas entre imagens de 2005-2007, 2008-2016 e 2016-2017.

Tabela 2 – Quadro síntese da dinâmica costeira mapeada a partir da comparação de imagens e fotografias aéreas para diferentes épocas. Foram obtidos valores de áreas envolvidas em cada processo (medida em metros quadrados - m²); taxa média de variação linear da linha de costa (em metros - m) e velocidade média dos processos em curso (expressa em metros por ano – m/ano).

Períodos de Análise	Área (m²)		Taxa Média (m)		Velocidade Média (m/ano)	
	Erosão	Progradação	Erosão	Progradação	Erosão	Progradação
1954-1964	147.757,20	349.339,83	29,26	63,88	2,93	6,39
1964-1974	66.483,94	197.003,81	8,71	19,78	0,87	1,98
1974-1976	299.181,18	3.296,17	26,05	2,89	13,03	1,45
1976-2000	297.710,31	605.544,50	83,89	90,44	3,50	3,77
2000-2005	86.444,60	104.592,47	21,70	11,71	4,34	2,34
2005-2007	230.858,56	5.494,36	17,83	0,00	8,92	0,00
2007-2008	12.922,60	107.946,87	6,64	12,28	6,64	12,28
2008-2016	40.018,62	331.414,50	58,61	33,11	7,33	4,14
2016-2017	210.923,22	4.175,59	21,25	1,30	21,25	1,30
2017-2019	45.656,15	43.378,52	8,07	8,54	4,03	4,27
1954-2019	1.031.238,59	687.147,77	164,97	166,66	2,54	2,56

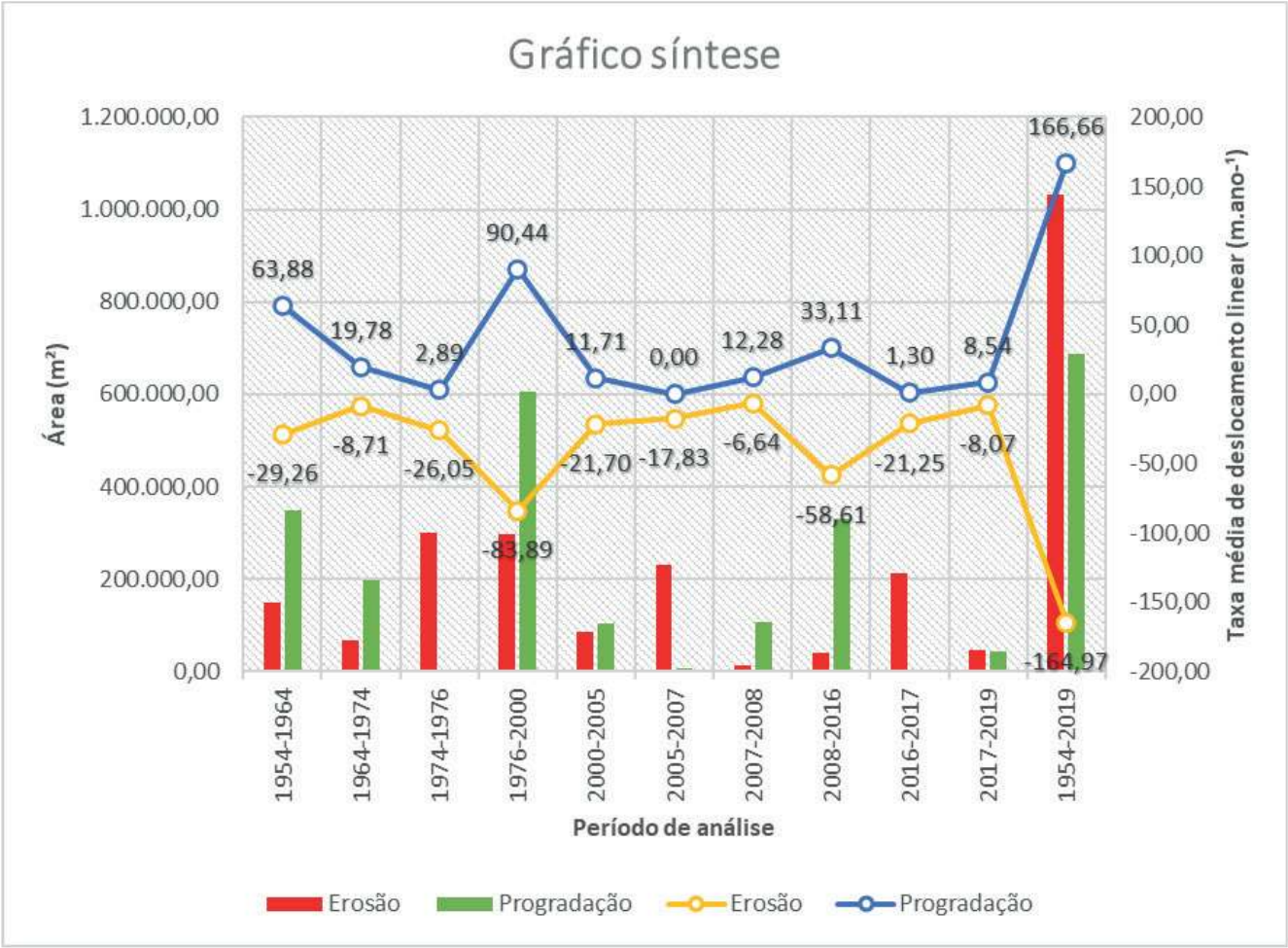

Fig. 3 – Gráfico síntese representativo da dinâmica observada na área de estudo.

Tabela 3 – Quadro representativo dos valores de erosão e progradação linear máxima por período.

Períodos de Análise	Variação Linear Máxima (m)	
	Erosão	Progradação
1954-1964	75,7	98,08
1964-1974	24,26	58,34
1974-1976	60	8,58
1976-2000	143,01	25,48
2000-2005	43,48	134,02
2005-2007	55,34	0
2007-2008	13,88	34,58
2008-2016	58,31	65,48
2016-2017	53,51	1,89
2017-2019	33,25	74,74
1954-2019	289	226

Entre 1964 e 1974 o processo de erosão mapeado anteriormente em Atafona fica restrito a uma pequena parte do pontal, enquanto todo o restante da área de estudo avança em direção ao mar. É nesse período que o pontal de Atafona apresenta seu maior desenvolvimento longitudinal, como pode ser visualizado na figura 4. A área progradada neste período equivale a 197.003,81 m² com uma taxa média linear de avanço de 19,78 m e velocidade média de 1,98 m.ano^{-1} (tabela 2 e nas figuras 3, 4 e 7).

Ao relacionar os dados obtidos a partir das imagens com o comportamento dos ventos, percebe-se que os períodos com predomínio de um único processo dinâmico ao longo de toda a costa, evidenciam momentos de maior intensidade da atuação dos ventos oriundos de um determinado quadrante. Assim, a partir da análise de registros diários dos ventos entre os anos de 1956 e 2001 para a estação meteorológica do Farol de São Tomé (cedidos pela DHN – Marinha do Brasil), foi possível calcular as médias das intensidades para cada ano e o percentual de distribuição para cada direção, facilitando a interpretação dos resultados.

Para o período de 1964 a 1974, observa-se uma diminuição das intensidades dos ventos provenientes dos quadrantes N-NE e um aumento no percentual dos ventos provenientes dos quadrantes S-SE (tabela 4). Essa dinâmica dos ventos teria gerado ondas com o mesmo sentido de propagação, transportado sedimentos de Sul em direção a Atafona, o que fica evidenciado pelo expressivo desenvolvimento longitudinal do pontal (figura 4).

Tabela 4 – Comportamento do regime de ventos para o período de 1964 a 1974 (Fonte: DHN).

Ventos - Período de 1964 a 1974		
Dinâmica predominante: Progradação		
Direção	Distribuição (%)	Intensidade (km/h)
Vento N	18,30	11,8
Vento NE	27,86	17,0
Vento S	15,00	13,3
Vento SE	6,51	9,2
Vento E	10,44	10,6
Vento SW	12,38	11,1
Vento W	8,56	10,1
Vento NW	1,64	6,2

Este período marcado pela ausência de processos erosivos na região coincide com a expansão imobiliária ocorrida no balneário de Atafona na mesma época (AZEVEDO, 2004). A relativa tranquilidade em relação a dinâmica costeira ao longo desta década, associada com a proximidade a cidade de Campos dos Goytacazes pode ter favorecido o aumento do interesse pela região, principalmente por parte de veranistas.

Os anos de 1974 e 1976 marcam um outro momento de predomínio de um único comportamento dinâmico ao logo de todo o litoral, neste caso o fenômeno erosivo. A área erodida chega a 299.181,18 m², enquanto que a taxa de variação linear média foi de 26,05 m com velocidade média de 13,3 m.ano^{-1} (tabela 2 e figuras 3, 4 e 7). Analisando os dados de vento para o período, é possível observar que há maior porcentagem de distribuição e intensidade dos ventos do quadrante N-NE em relação aos do quadrante S-SE (tabela 5). Esse regime de ventos N-NE mais intensos aumentaria também o transporte litorâneo na direção N-S, retirando sedimentos ao logo do litoral e transportando-os em direção ao Cabo de São Tomé.

Vasconcelos *et al.* (2016) reconstituíram o clima de ondas entre os anos de 2004 e 2007 para calcular o transporte residual na região. Os autores identificaram que o sentido predominante da deriva litorânea seria voltado para Sul, conforme já haviam apontado Dias e Gorini (1980) e Cassar e Neves (1993) e Machado (2009). De fato, o aumento na efetividade de transporte de sedimentos nesta direção pode incorrer em déficit sedimentar e consequente instalação do processo de erosão mapeado.

Tabela 5 – Comportamento do regime de ventos para o período de 1974 a 1976 (Fonte: DHN).

Ventos - Período de 1974 a 1976		
Dinâmica predominante: Erosão		
Direção	**Distribuição (%)**	**Intensidade (km/h)**
Vento N	25,46	19,5
Vento NE	23,59	22,2
Vento S	9,27	14,5
Vento SE	4,25	12,5
Vento E	9,80	14,0
Vento SW	14,81	15,6
Vento W	10,63	12,4
Vento NW	1,76	8,8

Embora no âmbito deste trabalho só tenham sido analisados dados de ventos disponíveis para o período de 1956 a 2001, é possível que os eventos de predominância de processos erosivos ao longo da costa mapeados para as épocas de 2005-2007 e 2016-2017 e de progradação identificado entre 2008-2016 (figuras 5, 6, 7 e 8) tenham sido influenciados pela mesma dinâmica atmosférica relacionada aos ventos locais. Contudo, os autores ressaltam a importância em atualizar a base de dados de ventos entre 2001 e 2019 para comprovar tal proposição. Valores detalhados de área, taxa média de variação linear e velocidade média para esses intervalos podem ser verificados na tabela 2 e figura 3.

Nas demais observações para os anos de 1976-2000, 2000-2005, 2007-2008 e 2017-2019, o padrão de ocorrência de dois setores com dinâmicas distintas com erosão ao norte e progradação ao sul voltaram a ocorrer, apresentando intensidades distintas dependendo do intervalo de tempo analisado (tabela 2 e figuras 3, 4, 5, 6, 7 e 8).

A persistência dos processos erosivos nos últimos anos tem colocado novamente em pauta propostas para conter, ou minimizar os impactos deste fenômeno sobre os moradores e a própria infraestrutura urbana em Atafona. Bulhões (2018), em relatório técnico apresentado à defensoria pública do Estado do Rio de Janeiro buscando esclarecer a ocorrência do fenômeno e indicar possibilidades de solução/minimização dos impactos, afirma que o uso cada vez maior de técnicas modernas de levantamento e processamento de dados têm ampliado significativamente a capacidade de "observar, monitorar, medir, explicar, divulgar e propor ações inovadoras" que possam levar a obtenção de sucesso e mitigação de impactos ao se intervir em fluxos e processos naturais em zonas costeiras.

Nordstrom (2010) destaca a importância de trabalhos que busquem detalhar informações a respeito da dinâmica costeira, segundo o autor "são esses resultados que devem subsidiar o dimensionamento de propostas de intervenção que visem a recuperação ambiental de praias, dunas e restingas".

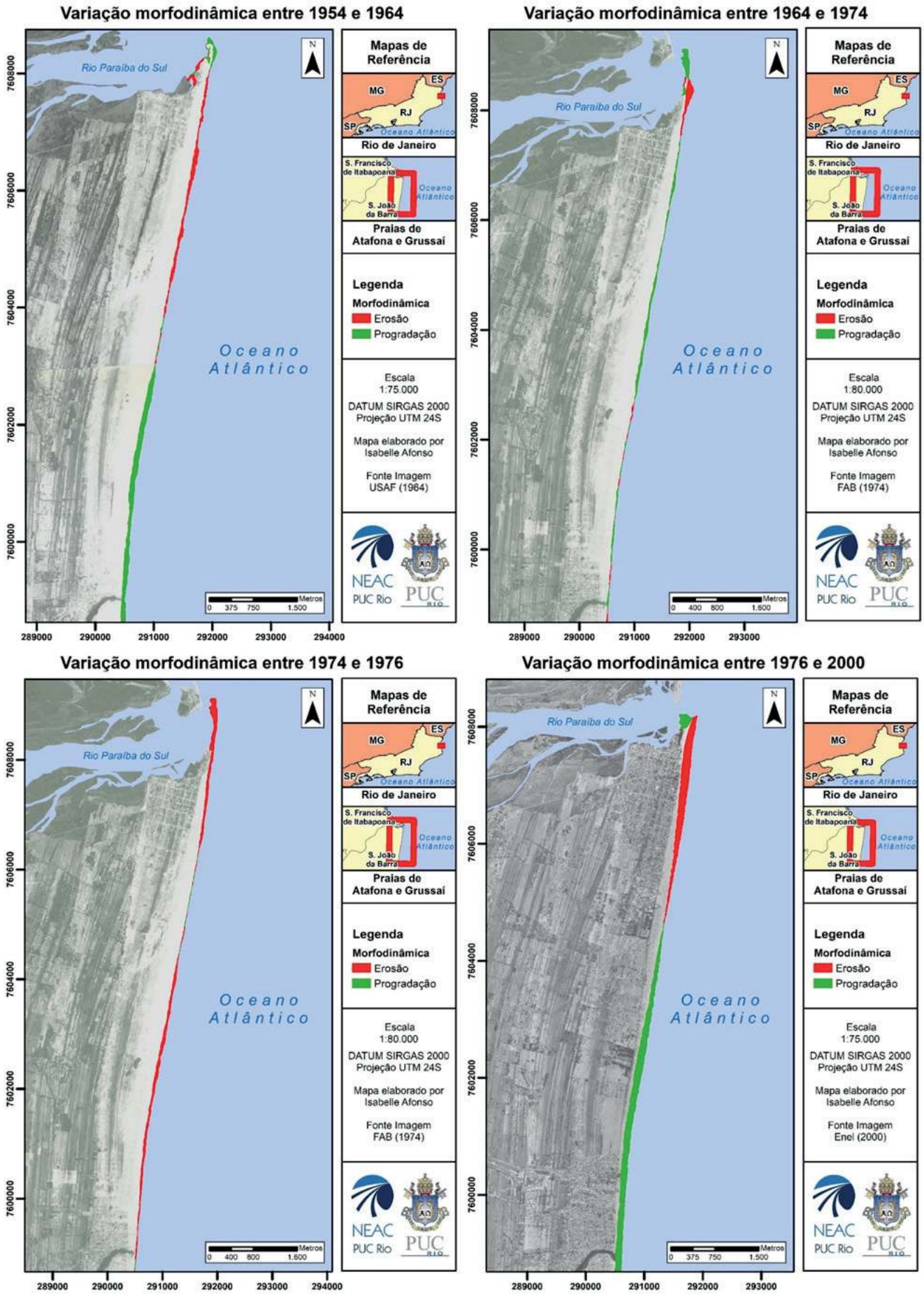

Fig. 4 – Variação em planta e área de ocorrência dos fenômenos 1954-1964, 1964-1974, 1974-1976 e 1976-2000.

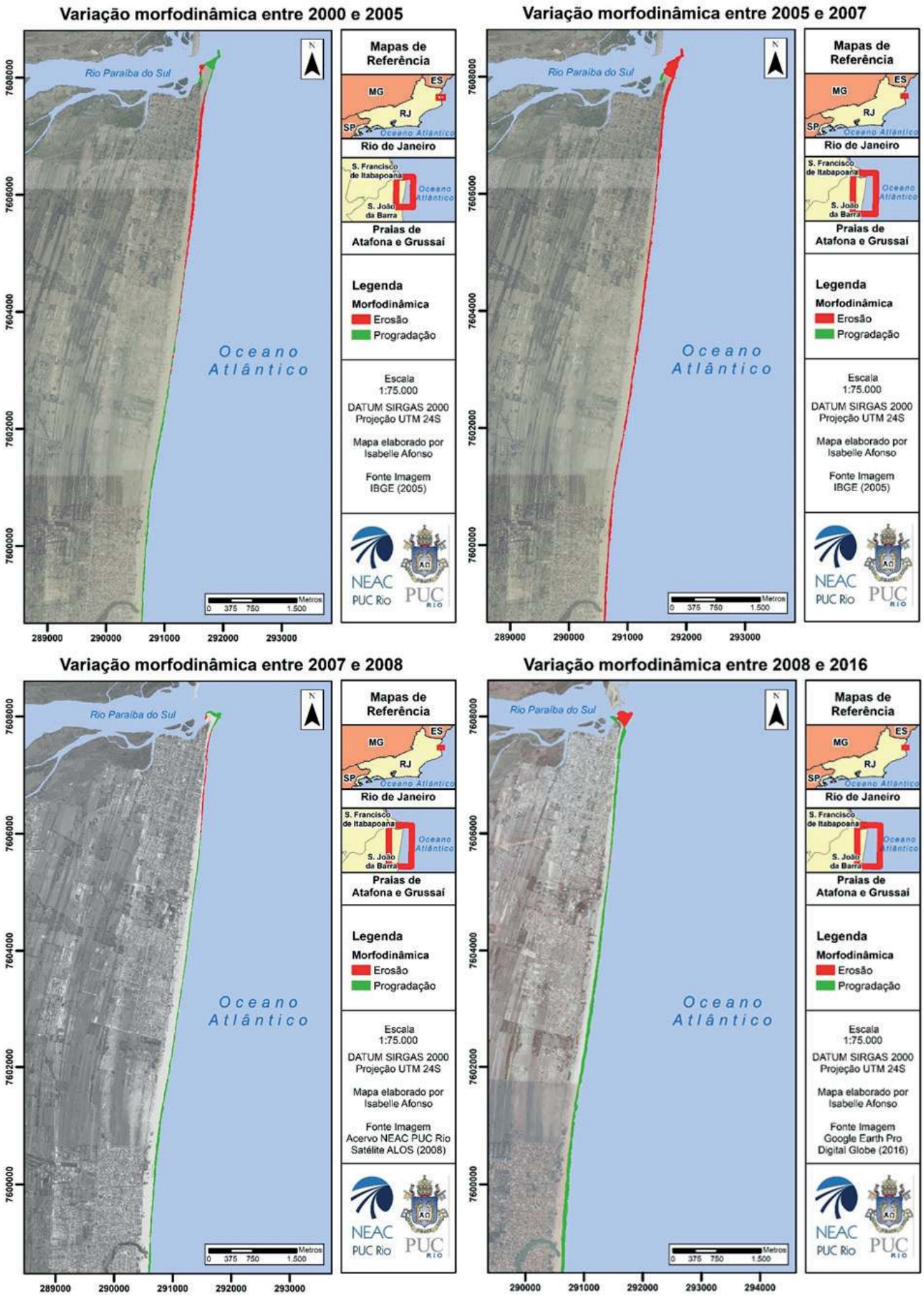

Fig. 5 – Variação em planta e área de ocorrência dos fenômenos 2000-2005, 2005-2007, 2007-2008 e 2008-2016.

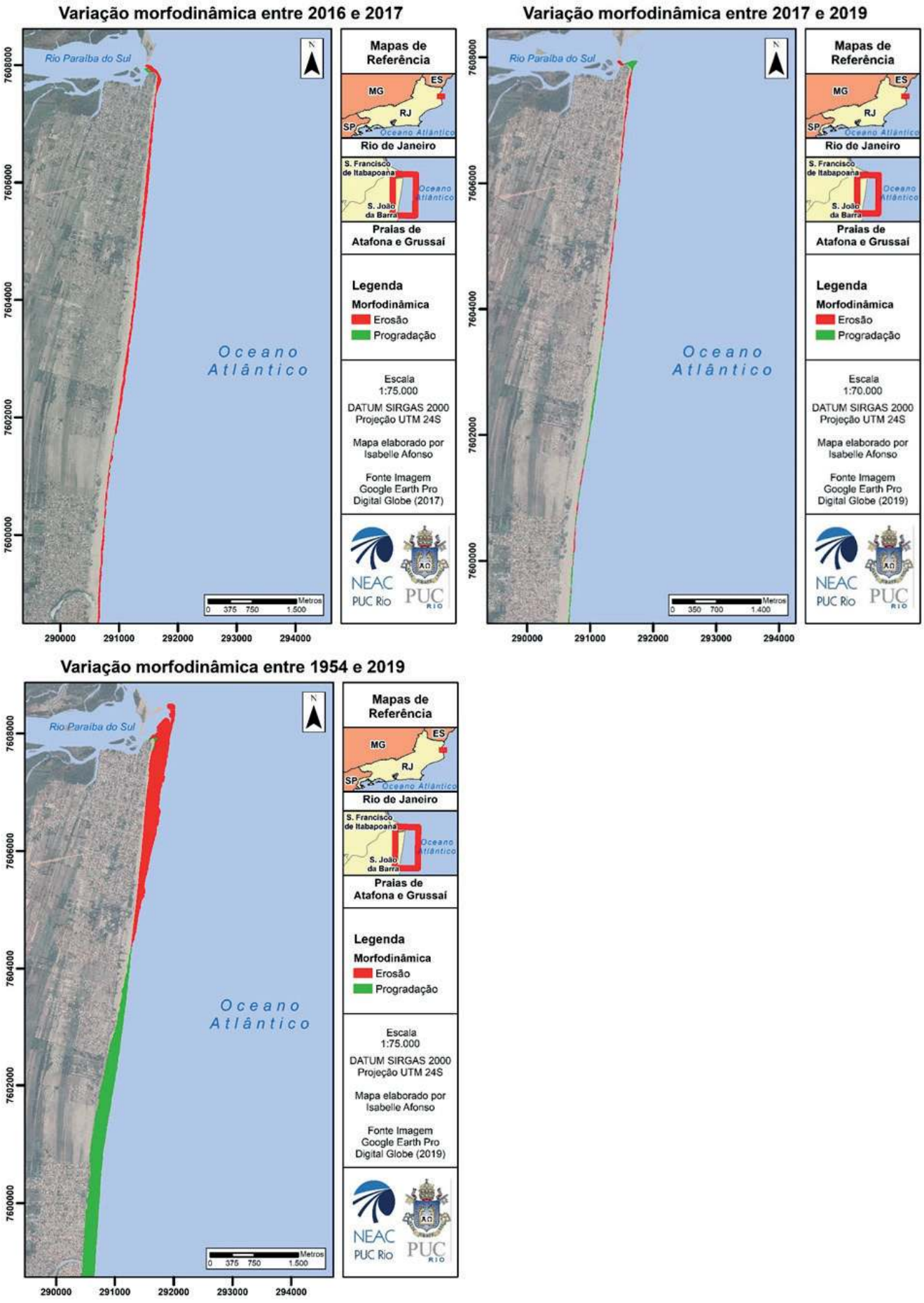

Fig. 6 – Variação em planta e área de ocorrência dos fenômenos 2016-2017, 2017-2019 e 1954-2019.



Fig. 7 – Gráfico de variação linear da linha de costa com medidas realizadas a cada 50m para as épocas de 1954-1964, 1964-1974, 1974-1976, 1976-2000, 2000-2005 e 2005-2007.

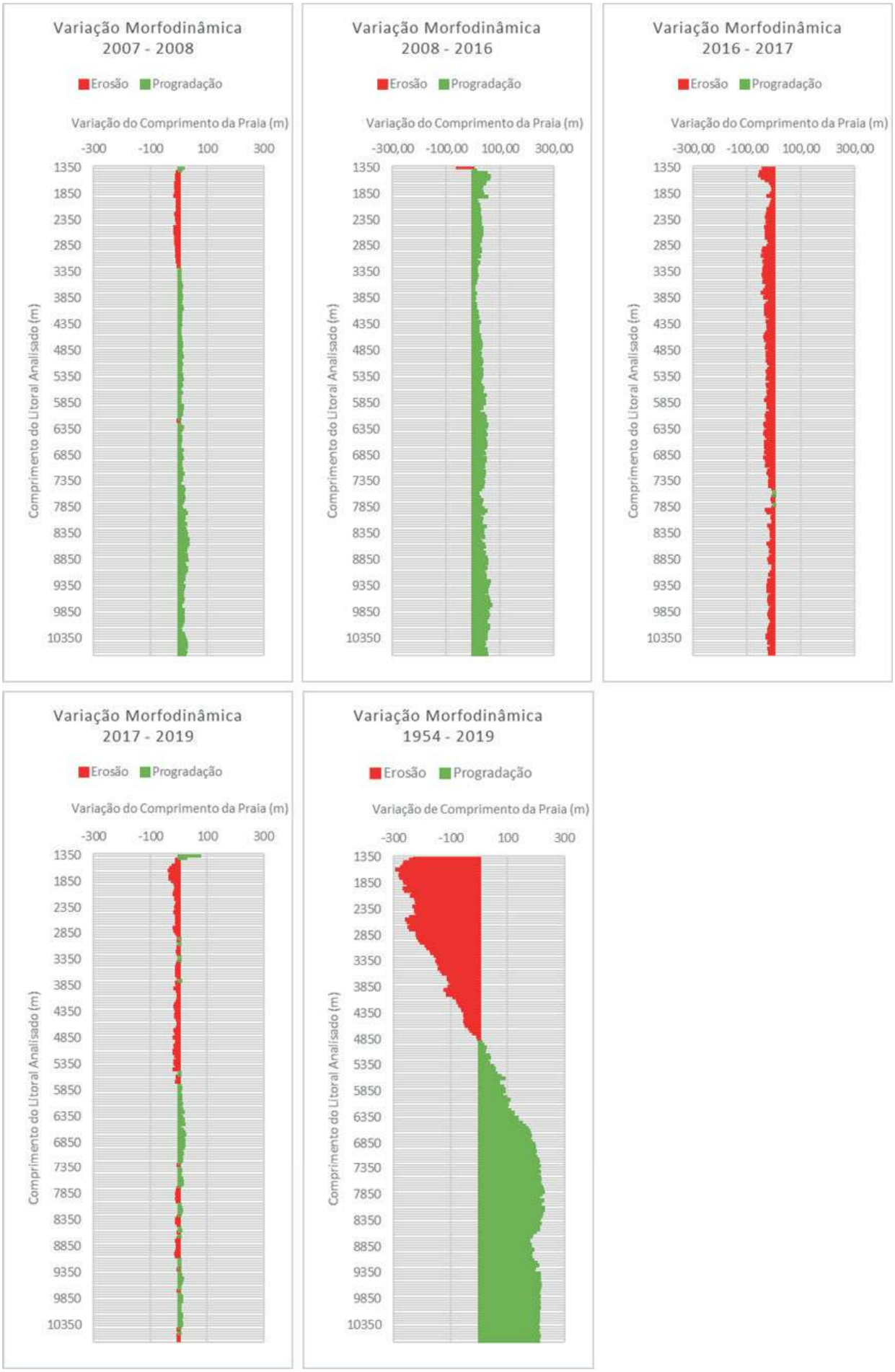

Fig. 8 – Gráfico de variação linear da linha de costa com medidas realizadas a cada 50 m para as épocas de 2007-2008, 2008-2016, 2016-2017, 2017-2019 e 1954-2019

Conclusões

O litoral ao sul da foz do rio Paraíba do Sul é marcado pela forte atuação de processos associados a dinâmica costeira que conferiu a este trecho da costa fluminense elevada mobilidade ao longo dos últimos 65 anos. Observa-se o estabelecimento de dois setores ao longo do litoral com tendência de comportamentos distintos, evidenciados pela ocorrência de erosão próximo ao distrito de Atafona e progradação em Grussaí.

As mudanças morfológicas detectadas permitiram estabelecer um quadro síntese da dinâmica costeira mapeada a partir da comparação de imagens para diferentes épocas. Foram obtidos valores de áreas envolvidas em cada processo; taxa média de variação linear da linha de costa, variação linear máxima e velocidade média dos processos em curso que permitiram ampliar os conhecimentos sobre o comportamento do litoral na área de estudo. Resta ainda investigar por que o tamanho da área erodida não é igual ao tamanho da área progradada e ao longo do tempo se alternam em uma maior que outra.

Este quadro bastante amplo e detalhado, possibilitou ainda observar que os processos em desenvolvimento não são contínuos e variam de intensidade ao longo do tempo, possivelmente em função da influência das condições climáticas, oceanográficas e hidrodinâmicas locais. Foram destacados a época de início do processo erosivo atual, estimada na década de 1950, assim como um período importante de ausência de erosão entre 1964 e 1974 que coincidiu com o período de expansão imobiliária do balneário Atafona.

Períodos com a dominância de um único comportamento dinâmico ao longo de toda a linha de costa também foram observados por diversas vezes e associados a períodos de intensificação dos ventos que dependendo da intensidade e direção com que atuem influenciam diretamente o transporte longitudinal, gerando déficit ou acreção sedimentar e modificando a linha de costa.

Espera-se que os dados adquiridos neste trabalho possam servir de apoio a tomada de decisão, principalmente em um cenário atual de crescente discussão a respeito de possibilidades de solução/ minimização dos impactos decorrentes do fenômeno erosivo. Além disso, o maior detalhamento sobre o comportamento da linha de costa nas últimas décadas abre uma perspectiva interessante sobre projeção de cenários futuros em um contexto de mudanças climáticas e elevação do nível do mar.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pela concessão de bolsa de Iniciação Científica, a PUC-Rio e UFF pela infraestrutura necessária para o desenvolvimento deste trabalho e a DHN pela disponibilização dos dados de ventos da estação meteorológica de Farol de São Tomé. Um agradecimento especial deve ser feito ao Prof. Dr. Alberto Garcia de Figueiredo Jr, coautor desta pesquisa, pelo incentivo inicial no desenvolvimento de estudos no delta do rio Paraíba do Sul e pelos inúmeros ensinamentos. Obrigado!

Referências

ALMEIDA. A. G; FIGUEIREDO JR, A. G. RIBEIRO, G. P. Estratigrafia do quaternário da planície deltaica ao sul do rio Paraíba do Sul. RJ. In: IX Simpósio de Geologia do Sudeste RJ. Rio de Janeiro. (2005).

ANGULO, R. J.; LESSA, G. C.; SOUZA, M. C. A critical review of mid- to late-Holocene sea-level fl uctuations on the eastern Brazilian coastline. Quaternary Science Reviews, n.25, p.486–506. (2006).

ARGENTO, M.S.F. 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. (1989).

AZEVEDO, M. V. H. Atafona, Patrimônio Mar Adentro: Formação, Planejamento e Destruição do Balneário de Atafona - RJ. 107 p. Dissertação (Mestrado em Planejamento Regional e Gestão de Cidades), Universidade Cândido Mendes. (2004).

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).

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

BIRD, E. Coastline Changes. New York, John Wiley and Sons, 219 p. (1985).

BOAK, E. H. e TURNER, I.L. Shoreline Definition and Detection: A Review. Journal of Coastal Research, Vol. 21, No. 4, p. 688-703. (2005).

BULHÕES, E. M. R. Erosão costeira e avanço do mar na localidade de Atafona. Causas, consequências e propostas de intervenção. Relatório Técnico N° 01/2018 apresentado a Defensoria Pública do Estado do Rio de Janeiro. Núcleo de Primeiro Atendimento da Comarca de São João da Barra – RJ. Geo Costeira - Unidade de Estudos Costeiros. Departamento de Geografia de Campos. Universidade Federal Fluminense. Campos dos Goytacazes. 38p. (2018).

CÂMARA, G.; DAVIS, C. Introdução. São José dos Campos, INPE, (2001). Disponível em:< http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap1-introducao.pdf >. Acesso em: 12 mai. 2020

CASSAR, J. C. M. e NEVES, C. F. 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. 107 p. Dissertação (Mestrado), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro. (1994).

DAVIDSON-ARNOTT, R. An Introduction to Coastal Processes and Geomorphology. Cambridge University Press. (2010).

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). p. 588-602, (1980).

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

DIAS, G.T.M. e SILVA, C. G. Exemplo de impacto causado por construção de estrutura rígida em área de intenso transporte litorâneo. In: CONGRESSO DA ABEQUA, X, Guarapari. Anais... CD-ROM. (2003).

DOMINGUEZ, J. M. L.; MARTIN, L.; BITTENCOURT, A. C. S. P. 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.; ROCHA, T. B.; PEREIRA, T. G. e FIGUEIREDO JR, A. G. Morfologia e dinâmica de praia entre Atafona e Grussaí, litoral norte do estado do Rio de Janeiro. In: VI Simpósio Nacional de Geomorfologia. Anais em CD-ROM. Goiânia. (2006).

FERNANDEZ, 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).

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).

KLEIN, A. H. F. Metodologia para a quantificação de perigos costeiros e projeção de linhas de costa futuras como subsídio para estudos de adaptação das zonas costeiras: litoral norte da Ilha de Santa Catarina e entorno. Ministério do Meio Ambiente – MMA. Brasília. (2016).

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).

MACHADO, K. M. Dinâmica Sedimentar na Planície do Paraíba do Sul – RJ. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geofísica Marinha). Instituto de Geociências, Universidade Federal Fluminense, Niterói (RJ). (2009).

MARTIN, L.; SUGUIO, K.; DOMINGUEZ, J. M. L.; FLEXOR, J. M. Geologia do Quaternário costeiro do litoral norte do Rio de janeiro e do Espírito Santo. CPRM Serviço Geológico do Brasil. 112p. (1997).

MAZZER, A. M., DILLENBURG, S. R., GOUVEIA SOUZA, C. R. Proposta de método para análise de vulnerabilidade à erosão costeira no sudeste da ilha de Santa Cataria, Brasil. Revista Brasileira de Geociências, volume 38 (2). (2008).

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

MUEHE, D. (Org.) Panorama da erosão costeira no Brasil. MMA - Ministério do Meio Ambiente. Brasília. (2018).

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

MUEHE, D. e KLUMB-OLIVEIRA, L. Deslocamento da linha de costa versus mobilidade praial. Quaternary and Environmental Geosciences, n. 05(2), p.121-124. (2014).

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

NORONHA, J. Atafona: sua história, sua gente. Academia Campista de Letras. (2007).

NORONHA, J. Uma dama chamada Atafona. São João da Barra: Cultura Goitacá, 120p. (2003).

PINHO, U. F. Caracterização do estado do mar na Bacia de Campos. 145 p. Dissertação (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro (RJ). (2003).

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

ROCHA T. B. Morfodinâmica costeira e gestão de orla marítima em costa sob influência fluvial: delta do Rio Paraíba do Sul. 141 p. Dissertação (Mestrado em Geografia). Universidade Federal Fluminense – UFF. Niterói, RJ. (2009).

ROCHA, T. B.; FERNANDEZ, G. B.; NASCIMENTO, L. C. Avaliação dos critérios morfodinâmicos para a fase de diagnóstico do Projeto Orla: um estudo de caso em praias arenosas com desembocaduras fluviais. Revista Sociedade & Natureza, 25 (2), p. 333-348, (2013).

ROCHA, T.B.; MACHADO, B.A.; SILVA, J.C.; MELLO, G.S.; PEREIRA, T.G.; FERNANDEZ, G.B. Interação morfodinâmica 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).

SANTOS, R. A. Processos de Erosão e Progradação entre as praias de Atafona e Grussaí - RJ. 36 p. Monografia (Graduação em Geografia) - Universidade Federal Fluminense – UFF. Niterói, RJ. (2006).

SILVA, C. G. Estudo da evolução geológica e geomorfológica da região da Lagoa Feia, RJ. 116 p. Dissertação (Mestrado em Geologia). Instituto Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ. (1987).

SOUZA C.R.G., SUGUIO K., OLIVEIRA A.M.S., OLIVEIRA P.E. (Orgs.) Quaternário do Brasil. São Paulo, Ed. Holos, 382 p. (2005).

SOUZA, C. R. G.; A erosão costeira e os desafios da gestão costeira no Brasil. Revista de Gestão Costeira Integrada, vol. 9, núm. 1, pp. 17-37 Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos. Lisboa, Portugal. (2009).

SOUZA, R. D. Propagação de ondas para águas rasas no litoral norte fluminense. 156 p. Dissertação (Mestrado em Geofísica e Geologia Marinha) Universidade Federal Fluminense – UFF. Niterói, RJ. (2011).

VASCONCELOS, S. C. Evolução morfológica das barreiras arenosas ao norte da desembocadura do rio Paraíba do Sul, RJ. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geofísica Marinha). Universidade Federal Fluminense. (2010).

VASCONCELOS, S. C.; FERNANDEZ, G. B. Dinâmica morfológica da borda norte do atual delta do rio Paraíba do Sul, RJ. XIII Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário – ABEQUA. Rio de Janeiro. (2011).

VASCONCELOS, S. C.; ROCHA, T. B.; PEREIRA, T. G.; ALVES, R. A.; FERNANDEZ, G. B. Gênese e morfodinâmica das barreiras arenosas no flanco norte do delta do rio Paraíba do Sul (RJ). Revista Brasileira Geomorfologia, v.17, n.3, p. 481-498 (2016).