



Prognóstico da Erosão Costeira no Litoral Setentrional do Rio Grande do Norte para os anos de 2020, 2030 e 2040

Caio Graco de Medeiros Franco¹, Venerando Eustáquio Amaro^{1,2},
Michael Vandesteem da Silva Souto^{1,3}

Resumo: A área de estudo está situada no litoral setentrional do Estado do Rio Grande do Norte, entre os municípios de Macau e Guamaré, Nordeste do Brasil. Trata-se de uma região de importância socioeconômica refletida no conflito de interesses das indústrias petrolífera, salineira, carcinicultura e eólica, pelo uso e ocupação do solo. A área é caracterizada por um sistema de ilhas barreiras que se estendem paralelas ao litoral e atuam como proteção natural do ecossistema estuarino da Reserva de Desenvolvimento Sustentável da Ponta do Tubarão. Imagens de satélite pretéritas decadais foram utilizadas para a delimitação das linhas de costa, usando a ferramenta Digital Shoreline Analysis System (DSAS/ArcGIS®). A partir dessas linhas de costa foram estabelecidos os critérios de análise geoestatística por meio da regressão linear, que corroborou a projeção de cenários da erosão costeira para as próximas três décadas. Essa estratégia permitiu a compreensão do comportamento evolutivo litorâneo, destacando a importância do monitoramento ambiental, focado nos agentes erosionais e na mitigação dos impactos ambientais decorrentes das projeções do avanço do nível do mar. O prognóstico da linha de costa resultou em perda de praias na zona costeira e, conseqüentemente, no desaparecimento das ilhas barreiras Ponta do Tubarão e Fernandez num período de no máximo 30 anos.

Palavras Chave: Prognóstico de linha de costa; Sistema de Ilhas Barreiras; Digital Shoreline Analysis System.

Abstract: *The study area is located on the northern coast of Rio Grande do Norte State, between the municipalities of Macau and Guamaré, Northeast Brazil. It is a region of socioeconomic significance reflected in the interest conflict by the oil, salt, shrimp and wind industries for the land use and occupation. The area is characterized by barrier islands system that extends parallel to the coastline and act as natural protection of the estuarine ecosystem Ponta do Tubarão Sustainable Development Reserve. Early decadal satellite images were used for the coastline delineation, using the tool Digital Shoreline Analysis System (DSAS / ArcGIS ®). From these coastlines were established the criteria for geostatistical analysis by linear regression, which corroborated the scenarios*

¹ Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica - Universidade Federal do Rio Grande do Norte

² Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte

³ Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza (CE)

Autor para correspondência: Venerando Eustáquio Amaro

Departamento de Geologia - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Campus Natal. Endereço: Av. Senador Salgado Filho, 3000, Lagoa Nova, Natal/RN. E-mail: amaro@geologia.ufrn.br

projection of coastal erosion for the next three decades. This strategy enabled the understanding of coastal evolutionary behavior, highlighting the importance of environmental monitoring, focusing on erosional agents and mitigate the environmental impacts of the projections of the sea level rising. The prognosis of the coastline resulted in beach loss on the coastal zone and thus in the disappearance of Ponta do Tubarão and Fernandez barrier islands in a maximum period of 30 years.

Key words: *Prognosis for coastline; Barrier Islands System; Digital Shoreline Analysis System.*

1. INTRODUÇÃO

Devido aos inúmeros benefícios socioeconômicos, como o fácil acesso à navegação oceânica, à pesca costeira, ao turismo e ao lazer, os assentamentos humanos estão mais concentrados na zona costeira. Hoje, aproximadamente 20% da população humana mundial vive em uma faixa de 30 km do mar e quase o dobro desse número vive em até 100 km de distância da costa (COHEN *et al.*, 1997). Segundo Bijlsma *et al.* (1996), nessa faixa costeira as populações estão crescendo o dobro da média global, o que torna os potenciais impactos da subida do nível do mar um foco importante nas avaliações de gestão costeira. Nicholls & Mimura (1998) estimaram que 600 milhões de pessoas ocuparão terras da planície de inundação costeira até 2100, tornando cada vez mais intensa a pressão sobre os ecossistemas costeiros. Tais pressões tendem a acarretar a perda de biodiversidade, branqueamento dos recifes de coral, introdução de novas doenças entre os organismos, hipóxia, proliferação de algas nocivas, assoreamento e erosão costeira, redução na qualidade de água e consequente ameaça à saúde humana. As alterações climáticas, consequências do aquecimento global, e a decorrente elevação do nível do mar aumentarão ainda mais os riscos de inundações das zonas costeiras. O nível médio do mar, em escala global, é esperado subir cerca de 0,5 m até 2100, mas segundo Rowley

et al. (2007) esse aumento poderá variar de 1,0 a 6,0 m, regional e localmente para diferentes regiões costeiras no mundo, devido aos fatores como a subsidência de terrenos geológicos, às induções antropogênicas e/ou as alterações no fluxo hidrodinâmico dos oceanos.

O processo de erosão costeira tem se tornado uma polêmica de âmbito global, principalmente quando se trata dos efeitos lesivos sobre as atividades antrópicas instaladas na zona costeira. Logo, para o litoral setentrional do Rio Grande do Norte a elevação mínima do nível do mar em apenas 1,0 m acarretaria uma catástrofe socioeconômica e ecológica, se considerado o quadro atual de uso e ocupação atual da faixa litorânea (SOUTO, 2009; BOORI & AMARO, 2010; BOORI & AMARO, 2011).

Atualmente, sabe-se que diversos fatores influenciam na conformação da zona costeira tais como, as características da geologia das faixas litorâneas e da plataforma continental adjacente, a geometria predominante das descontinuidades, incluindo a influência da geometria dos lineamentos topográficos e geológicos (AMARO, 1998; VALENTIM DA SILVA & AMARO, 2008), dos planos de acamamento e ângulos de mergulhos das camadas das unidades sedimentares que alcançam a costa, além de outros fatores tais como os níveis do lençol freático, os processos sedimentares recentes e os impactos de

uso e ocupação da zona costeira. Além disso, os fatores hidrodinâmicos e meteorológicos são fatores que influenciam as constantes mudanças observadas nas zonas costeiras.

O uso de técnicas de geoprocessamento é um aliado importante nos estudos voltados ao gerenciamento de ecossistemas costeiros, no intuito de minimizar os impactos ambientais gerados pela erosão da linha de costa com base na análise de dados multifontes, a maioria deles procedente de produtos de sensoriamento remoto multitemporais. Estas ferramentas geram informações que são manipuladas em base georreferenciadas no ambiente Sistema de Informações Geográficas (SIG).

O objetivo deste artigo foi elaborar os prognósticos de cenários baseados em estimativas geoestatísticas da evolução da linha de costa para os próximos 30 anos do sistema de ilhas barreiras no Estuário Diogo Lopes, litoral setentrional do RN, a partir da análise das linhas de costa desde a década de 60 até o presente, perfazendo o período de 1967 a 2009. Esta análise permitiu a elaboração do modelo geoestatístico que atende as peculiaridades e complexidades geomorfológica e geológica da área de estudo, tendo como base os parâmetros dos algoritmos do *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS, do *United States Geological Survey*, o Serviço Geológico Americano), desenvolvido por Thieler et al. (2005).

Os dados foram submetidos ao cálculo por regressão linear que resultou na geração de equações que permitiram confeccionar as prováveis linhas de costa futuras. O prognóstico dessas linhas permitiu estimar a previsão de cenários para os anos de 2020, 2030 e 2040 inseridos no modelo, possibilitando interpretações específicas sobre a área

de estudo, inserida no contexto da Reserva de Desenvolvimento Sustentável da Ponta do Tubarão (RDSPT) constituída pela Lei Estadual no 8.349 de 18 de Julho de 2003. Espera-se que os dados apresentados constituam um subsídio aos gestores públicos e órgãos governamentais para que atuem junto às comunidades costeiras e às empresas com interesses econômicos na faixa costeira, para que atentem as previsões de avanço do mar e alagamentos da orla. Conta-se com o uso deste estudo em apoio à elaboração de políticas de planejamento estratégico para o convívio e adaptabilidade ou, nos casos mais extremos, com remobilização completa das comunidades e instalações hoje presentes na área de estudo, contribuindo assim para o desenvolvimento sustentável da região costeira do RN.

2. Caracterização da Área de Estudo

2.1- Localização Geográfica

A área de estudo está localizada no litoral setentrional do Estado do Rio Grande do Norte (RN), entre os municípios de Macau e Guamaré, e envolvendo os distritos de Barreiras e Diogo Lopes. Esta região apresenta uma área total de aproximadamente 76,5 km², delimitada pelas coordenadas UTM Zona 24 Sul, com o Datum SAD-1969, entre os meridianos 9.435.777 e 9.440.934 mN e os paralelos 772.268 e 787.101mE (Figura 1).

2.2 - Clima e Processos Costeiros

O clima da região pode ser classificado, segundo Nimer (1972), como do tipo, Semiárido quente com regime Tropical de Zona Equatorial, em que nos meses de junho a janeiro ocorre à estação da seca (verão ou estiagem) e nos meses de fevereiro a maio a estação chuvosa (chuvoso ou de inverno, como é conhecido esse período na região).

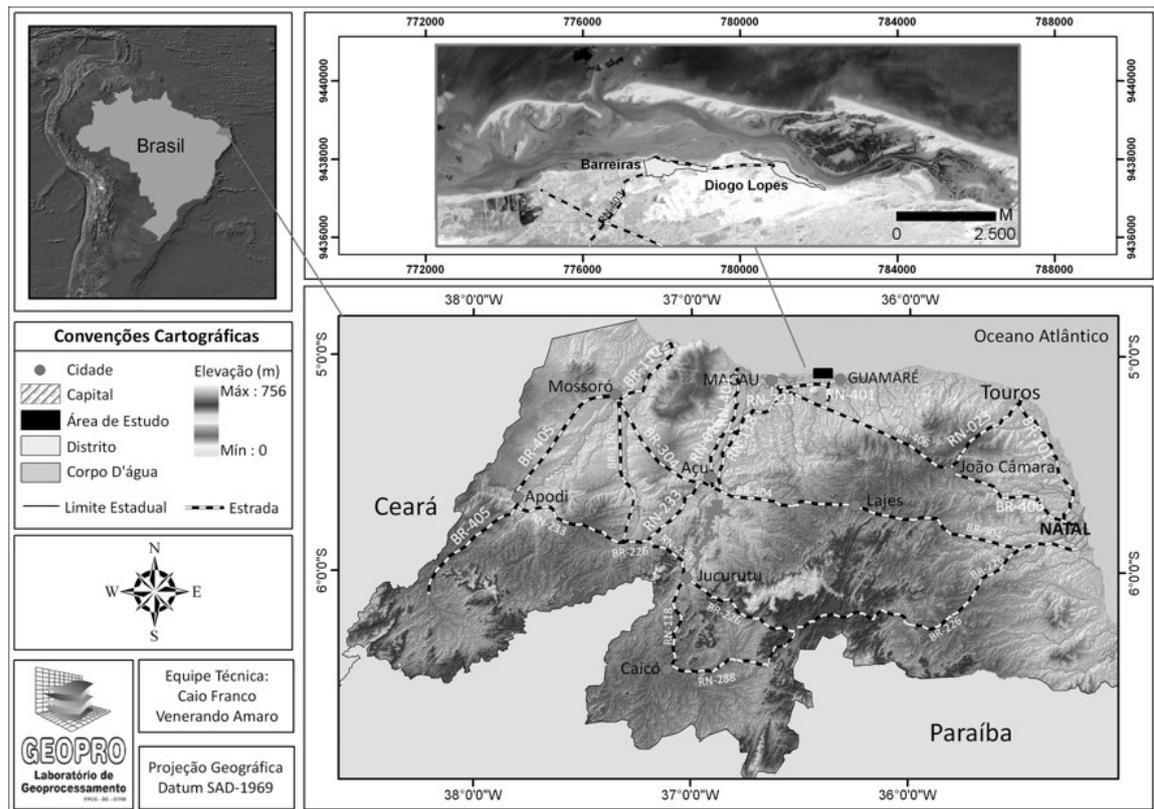


Figura 1 – Localização e vias de acesso da área de estudo a partir da cidade de Natal.

A ação dos ventos condiciona a formação de ondas e correntes que influenciam diretamente nos processos morfodinâmicos de erosão/acresção nas praias, modificando a morfologia costeira pelo modelamento da linha de costa (AMARO & ARAÚJO, 2008). Os ventos predominantes são os alísios que sopram de SE, NE e E, influenciados pelas oscilações da Zona de Convergência Intertropical, em que os ventos oriundos da direção E ocorrem entre os meses de setembro a abril e os ventos de direção SE ocorrem entre os meses de maio a agosto (SILVEIRA, 2002). Segundo Chaves et al. (2006), as velocidades dos ventos para o Município de Macau variam de 5 m/s no mês de abril até 9 m/s entre os meses de agosto a outubro, estes os valores mínimo e máximo, respectivamente. As brisas marinhas atuantes na região são mais intensas nos meses de setembro e outubro, com média de 7,0 m/s na direção E/SE, e mais fracas em

março e abril com média de 4,5 m/s na direção E (NASCIMENTO, 2009).

As ondas, quando se aproximam obliquamente da linha de costa (na direção NE), induzem a formação de correntes de deriva litorânea (em direção W). Essas correntes movimentam-se paralelamente a linha de costa e transportam grandes quantidades de sedimentos ao longo do litoral em movimentos de fluxo e refluxo. De acordo com Chaves et al. (2006), as ondas apresentam energia moderada à alta, com incidência de E, NE e SE, atingindo alturas entre 10 e 80 cm no período de 4 e 8 segundos.

As correntes litorâneas na região de Macau apresentam velocidades máximas de 1,10 m/s e mínima de 0,17 m/s na direção W, nos meses de novembro e maio, respectivamente (CHAVES & VITAL, 2001).

O regime de marés é representado por mesomaré semidiurna, com maré de

quadratura (baixamar) mostrando nível mínimo de 127,8 cm e maré de sizígia (preamar) chegando a atingir altura máxima de 284,6 cm (SOUTO, 2009). Esse regime influencia diretamente no transporte dos sedimentos, sendo ressaltado pelas barras de maré enchente e barras de maré vazante.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A maioria dos trabalhos sobre a aplicação de modelos geoestatísticos aos processos de mudanças da linha de costa, baseados nos algoritmos do DSAS, foram realizados nos Estados Unidos, mas o modelo geoestatístico permite adequações que melhor se adaptem à área de estudo. Logo, a melhor forma de utilização dos métodos depende dos objetivos específicos e das variáveis de tempo especificamente para cada trecho de praia. Portanto, este item faz referência ao modo como foram gerados os dados geoestatísticos multitemporais, o desenvolvimento do modelo geoestatístico, o uso e especificidade de alguns detalhes da área. Dolan et al. (1991) foram os primeiros a utilizar o método de regressão linear para esse tipo de aplicação, continuamente empregado até trabalhos mais recentes (GENZ et al., 2007), sendo este o procedimento metodológico que foi adotado neste trabalho.

3.1 Dados Multitemporais e Cálculo Geoestatístico

A geoestatística permite descrever a continuidade espacial, representativo de muitos fenômenos naturais e adapta as técnicas de regressão para tirar vantagem dessa continuidade (Isaaks & Srivastava, 1989). Ela oferece um conjunto de ferramentas estatísticas que incorporaram no processamento as coordenadas espaciais das observações (Goovaerts,

1997), onde os procedimentos matemáticos permitem que se reconheçam e descrevam relacionamentos espaciais existentes.

Para o trabalho em questão os componentes foram gerados da seguinte forma: as linhas de base tiveram que ser criadas aproximadamente paralelas a linha de costa, a fim de atender com maior precisão a variação da linha do litoral em relação ao tempo; os transectos foram construídos perpendiculares à linha de base, com espaçamento de 300 m, em cada linha de base; e as linhas de costa foram vetorizadas a partir da interpretação das imagens de satélites e fotografia aérea processadas, diferenciando a parte úmida (mar) e a parte seca da praia (terra) nos anos de 1967 a 2009.

3.2. Prognóstico da Linha de Costa

O prognóstico da linha de costa refere-se à projeção futura da localização do litoral. O método utilizado para criação do modelo foi o de regressão linear, que consiste em fornecer uma equação da reta, na qual descreve o relacionamento entre às variáveis tempo (anos) e espaço (metros), ou seja, a relação entre uma variável quantitativa pode ser explicada a partir da outra. Também é possível identificar áreas de erosão e deposição de acordo com a inclinação da reta do gráfico.

As equações de regressão são úteis na predição do valor de uma variável (espaço), a partir de um determinado valor de outra variável (tempo), porém a regressão só é confiável quando a correlação das variáveis é significativa (Andriotti, 2003). Os valores que são submetidos ao cálculo de regressão linear resultam na equação da reta. Esta equação foi utilizada no cálculo da projeção da linha de costa para as

$$\begin{array}{c} \text{Tempo} \\ \text{Equação da reta } Y = a.X + b \uparrow \\ \downarrow \\ \text{Espaço} \end{array}$$

Outro parâmetro calculado no modelo é o coeficiente de determinação (R²), que é a proporção da variação total em Y (espaço), explicada pelo ajuste da regressão (ANDRIOTTI, 2003). Logo, se o valor é de R² = 0,9588 isso indica que 95,88% da variação de Y (espaço) e explicada pela variação de X (tempo) e 4,12% da variação restante permanece não explicada pela variação de X. No entanto, uma associação significativa entre os valores de X e Y não necessariamente implica em uma relação de causa e efeito, isto é, a variação da linha de costa não é causada pela variação do tempo, mas sim pelas condições naturais dos processos hidrodinâmicos e costeiros. Porém a mudança do litoral apresenta uma relação significativa com o tempo, possibilitando mensurar esta variação.

3.3. Validação do Modelo

No intuito de criar um modelo geoestatístico coerente com a realidade foram feitos testes com determinados dados existentes, que seriam as datas de 1967 até 2009 (Tabela 1). Porém, ao submeter-se o modelo a muitos dados podem ocorrer perturbações no resultado. Na intenção de minimizar essas perturbações, e compará-las ao modelo com o conjunto total de dados, foram desenvolvidos dois modelos, variando apenas a quantidade de dados referentes as datas das linhas de costa.

No primeiro modelo foram inseridos dados com mais de uma data por década, tendo sido selecionadas os anos de 1967, 1973, 1976, 1977, 1981,

1984, 1989 e 1998, e submetidas ao cálculo de regressão linear, gerando uma equação capaz de projetar para o ano de 2009. O segundo modelo foram utilizados apenas uma data por década, sendo as datas de 1967, 1976, 1989 e 1998, também projetadas para mesma data do primeiro modelo para o ano de 2009.

O primeiro modelo apresentou erro médio de 130 m de distância da posição da linha de costa de 2009 e valor de R² médio de 0,70. O segundo modelo apresentou erro médio de 70 m e R² de 0,87. Entendeu-se, portanto, que o segundo modelo, representado por apenas uma data por década, seria mais adequado para caracterizar a linha de costa real para o ano de 2009.

No entanto, devido a falta de registros em imagens de décadas passadas, a Ilha Ponta do Tubarão experimentou a estimativa de projeção para o ano de 2020, utilizando as datas de 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008 e 2009, obtendo valor médio de R² = 0,97.

A área de estudo foi dividida em 5 (cinco) subáreas (Figura 2), proposição metodológica decorrente da disposição geométrica atual da linha de costa, da relação da linha de costa para o mar aberto com aquela voltada para os canais de maré, e do nível de instabilidade geomorfológica de cada subárea, associados também à possíveis feições de falhamentos subjacentes e que possivelmente influenciam no contexto de erosão e deposição sedimentar na margem extremo oeste da área estudada (NASCIMENTO, 2009; RIOS, 2011).

Tabela 1 - Acervo de imagens orbitais e fotografias aéreas empregadas para aquisição da linha de costa.

Data	Plataforma	Sensor	Resolução	Situação
1967	Fotografia Aérea	-----	-----	Prognóstico Subárea (2,3,4,5)
17/05/1976	Landsat	1-MSS	80 m	Prognóstico Subárea (2,3,4,5)
02/08/1989	Landsat	5-TM	30 m	Prognóstico Subárea (2,3,4,5)
28/09/1998	Landsat	5-TM	30 m	Prognóstico Subárea (2,3,4,5)
13/06/2000	Landsat	5-TM	30 m	Prognóstico Subárea (1)
26/07/2001	Landsat	7-ETM+	30 m	Prognóstico Subárea (1)
06/11/2002	Landsat	7-ETM+	30 m	Prognóstico Subárea (1)
29/05/2003	Landsat	7-ETM+	30 m	Prognóstico Subárea (1)
05/10/2004	CBERS	2-CCD	20 m	Prognóstico Subárea (1)
30/10/2005	CBERS	2-CCD	20 m	Prognóstico Subárea (1)
03/10/2006	CBERS	2-CCD	20 m	Prognóstico Subárea (1)
03/04/2007	CBERS	2-CCD	20 m	Prognóstico Subárea (1)
05/07/2008	Landsat	5-TM	30 m	Prognóstico Subárea (1)
08/07/2009	Landsat	5-TM	30 m	Prognóstico Subárea (1,2,3,4,5)

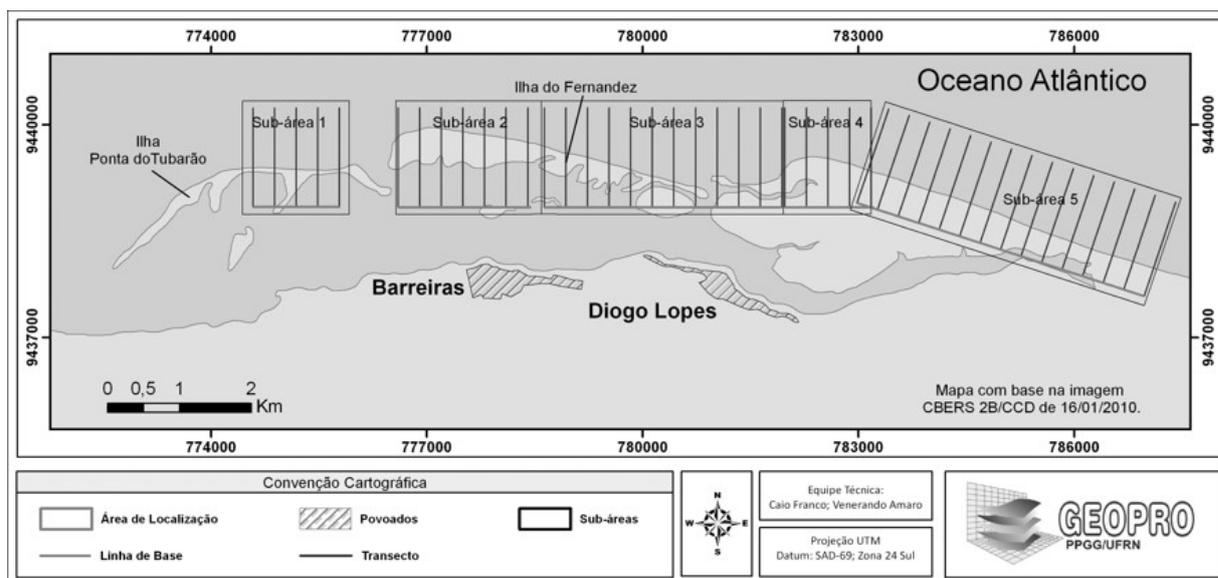


Figura 2 – Mapa da área de estudo indicando a subdivisão da área em subáreas e a disposição dos transectos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Modelos de Prognósticos

O fator de projeção, que representa “o quanto” pode-se estimar a partir das informações de intervalo de tempo (anos), permite definir o valor máximo de projeção da linha de costa numa margem segura de erros. Na obtenção do intervalo de

tempo que possa subsidiar a projeção da linha de costa nos anos seguintes é necessário conhecer o range de tempo entre a data mais antiga e mais recente usada no cálculo geoestatístico.

Efetuada a data mais recente pela mais antiga (2009-1967) obtem-se um intervalo de 42 anos. Isso significa que se trata de um ciclo de 42 anos de observação da modificação da linha de costa, sendo possível subdisidir, com segurança, a projeção da linha de costa para os próximos 30 anos. No entanto, este caso refere-se apenas as subáreas 2, 3, 4 e 5.

No cálculo de projeção da Subárea 1, referente a linha de costa da ilha barreira da Ponta do Tubarão, quantificou-se o intervalo de anos usando o intervalo de 2000 a 2009, validando os 9 anos, o que corroboraria com a projeção até o ano de 2018. Entretanto, devido ao valor de R2 médio, de 0,97, ser elevado, ao utilizar um intervalo de confiança de 95%, pode-se aumentar a estimativa em 2 anos, validando a

projeção até 2020 (Figura 3). Observou-se na projeção para 2020 que a linha costeira irá recuar, aproximadamente, 360 m, no sentido N-S (Figur. 4). Neste estágio evolutivo, a linha de projeção encontrará dentro do estuário, representado assim a erosão completa da ilha Ponta do Tubarão.

No cálculo de regressão da parte oeste da Ilha do Fernandez (Subárea 2) obteve-se o resultado para o R2 médio de 0,65, utilizando o intervalo de confiança de 95%. Assim, foi possível projetar para os anos de 2020, 2030 e 2040 (Figura 5). O menor valor de R2 está relacionado às mudanças laterais da ilha, devido a migração dos sedimentos de leste para oeste influenciado pela corrente de deriva litorânea. Nos valores medidos de projeção da linha no sentido N-S, constatou-se que em 2020 a porção

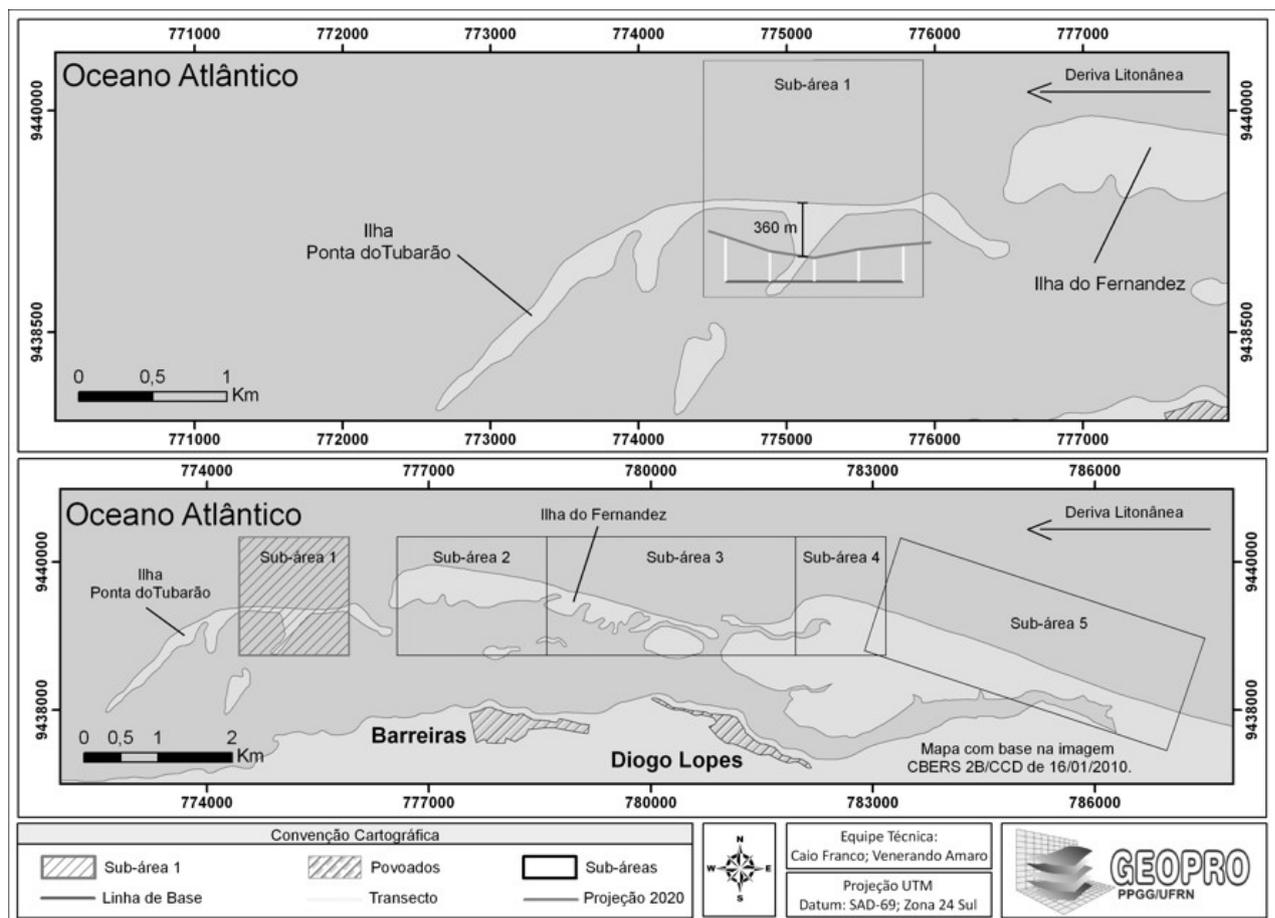


Figura 3 - Projeção do cálculo de regressão linear para o ano de 2020 da Ilha Ponta do Tubarão.

oeste da Ilha do Fernandez sofrerá um recuo de 283 m, aumentado nas décadas subsequentes para 308 m em 2030 e

496 m em 2040, ou seja, a ilha desaparecerá totalmente.

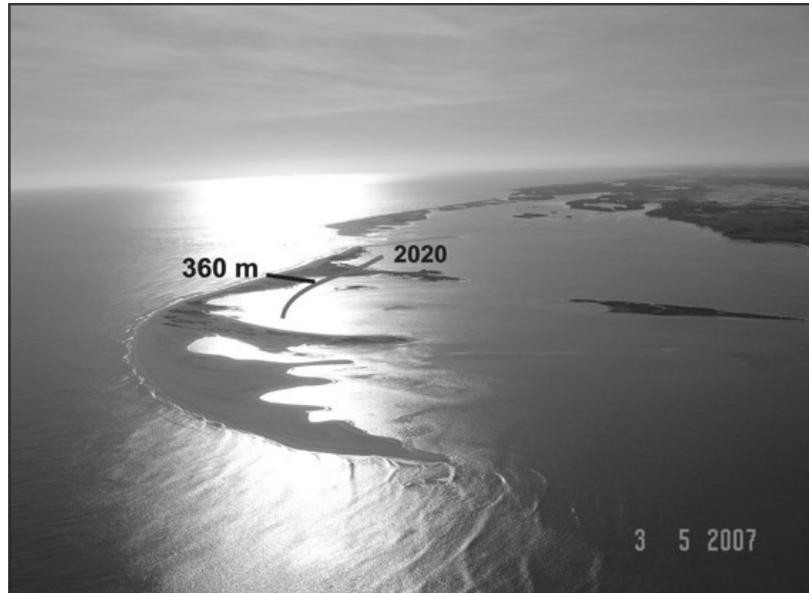


Figura 4 - Fotografia aérea de pequeno formato, com visada W-E da Subárea 1, em representação esquemática da projeção da linha de costa prevista para 2020 na Ilha Ponta do Tubarão, recuando em 360 metros, no sentido N-S. Fonte: GEOPRO/UFRN.

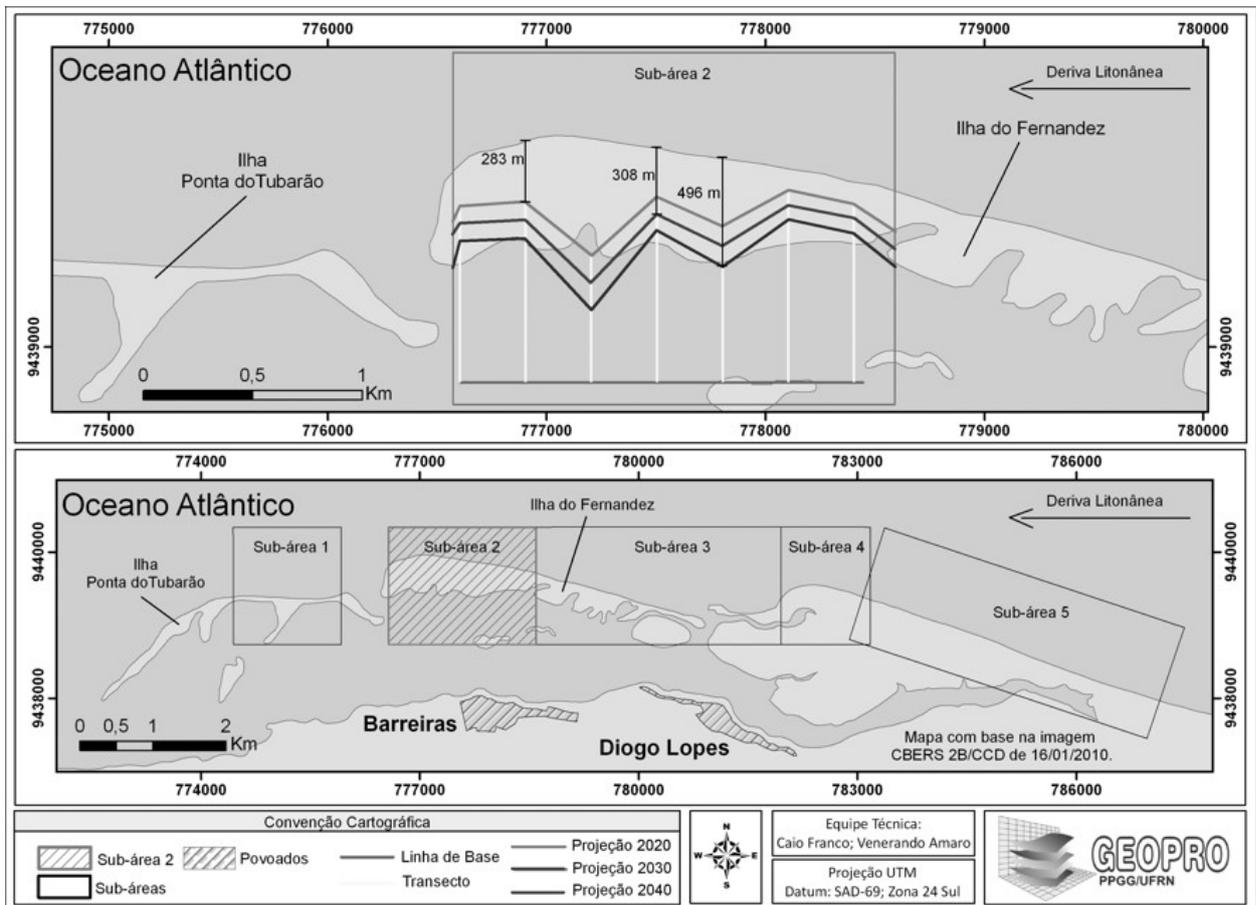


Figura 5- Projeção do cálculo de regressão linear para o ano de 2020, 2030 e 2040 da porção oeste da ilha do Fernandez.

A Subárea 3, setor leste da Ilha do Fernandez, apresentou R2 médio de 0,88, no intervalo de confiança de 95%. Nesta porção da ilha o valor de R2 é mais elevado, por tratar-se de um local onde não há migração lateral da ilha, permitindo uma estimativa segura para os anos de 2020, 2030, 2040 (Figura 6). Em 2020 a projeção máxima no sentido N-S será de 170 m, valor inferior aquele na porção oeste da ilha. No ano de 2030, a Ilha do Fernandez terá perdido 258 m de extensão N-S, em relação à disposição atual, culminando no ano de 2040 na erosão de 281 metros (Figura 7) e desaparecimento total da ilha, restando a conformação em barras arenosas. Destaca-se que ocorrerá a abertura de canais de maré (*tidal inlets*) promovendo maior instabilidade geomorfológica da ilha e conseqüentemente erosão mais acentuada, além de colocar o Estuário de

Diogo Lopes totalmente vulnerável às intempéries de mar aberto.

Na Subárea 4, conhecida como “Barra Nova”, o valor médio de R2 foi de 0,24, variação pouco linear no intervalo de confiança de 80%. Apesar da seleção apurado dos dados, forçado pela diminuição do intervalo de confiança, a relação da variação da linha de costa com o tempo mostrou valores menores que nas demais subáreas. Esse resultado pode ser uma resposta ao controle estrutural a que a Subárea 4 está inserida, pois as projeções apresentaram variação pouco significativa, caracterizando uma região mais estável em relação ao processo de erosão (Figura 8). Os valores de variação N-S da linha de costa, mostraram para 2020 uma perda de faixa de praia de 61 m e no ano de 2040 o trecho terá sido erodido em 143 metros.

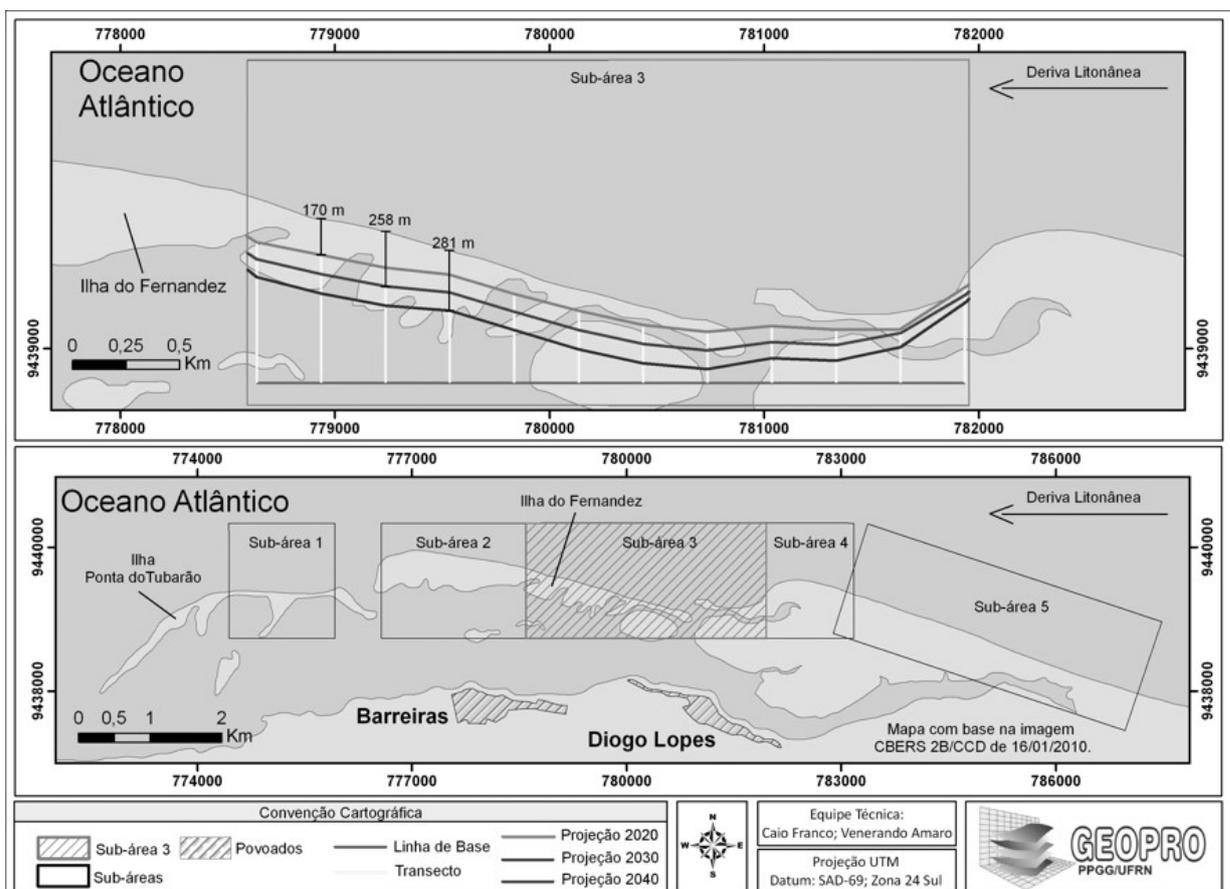


Figura 6 - Projeção do cálculo de regressão linear para o ano de 2020, 2030 e 2040 da porção leste da ilha do Fernandez, Subárea 3.

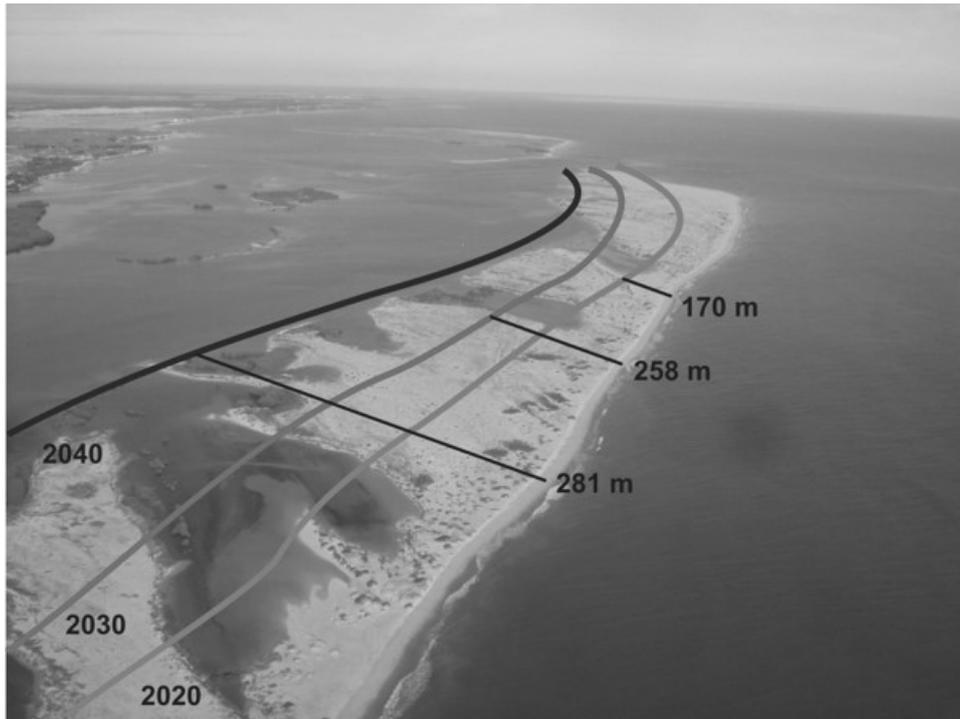


Figura 7 - Fotografia aérea de pequeno formato com representação esquemática da projeção para 2020, 2030 e 2040 da Ilha do Fernandez, com recuos de 170 m, 258 m e 281 m, respectivamente, Sub-Área 4. Fonte: GEOPRO/UFRN.

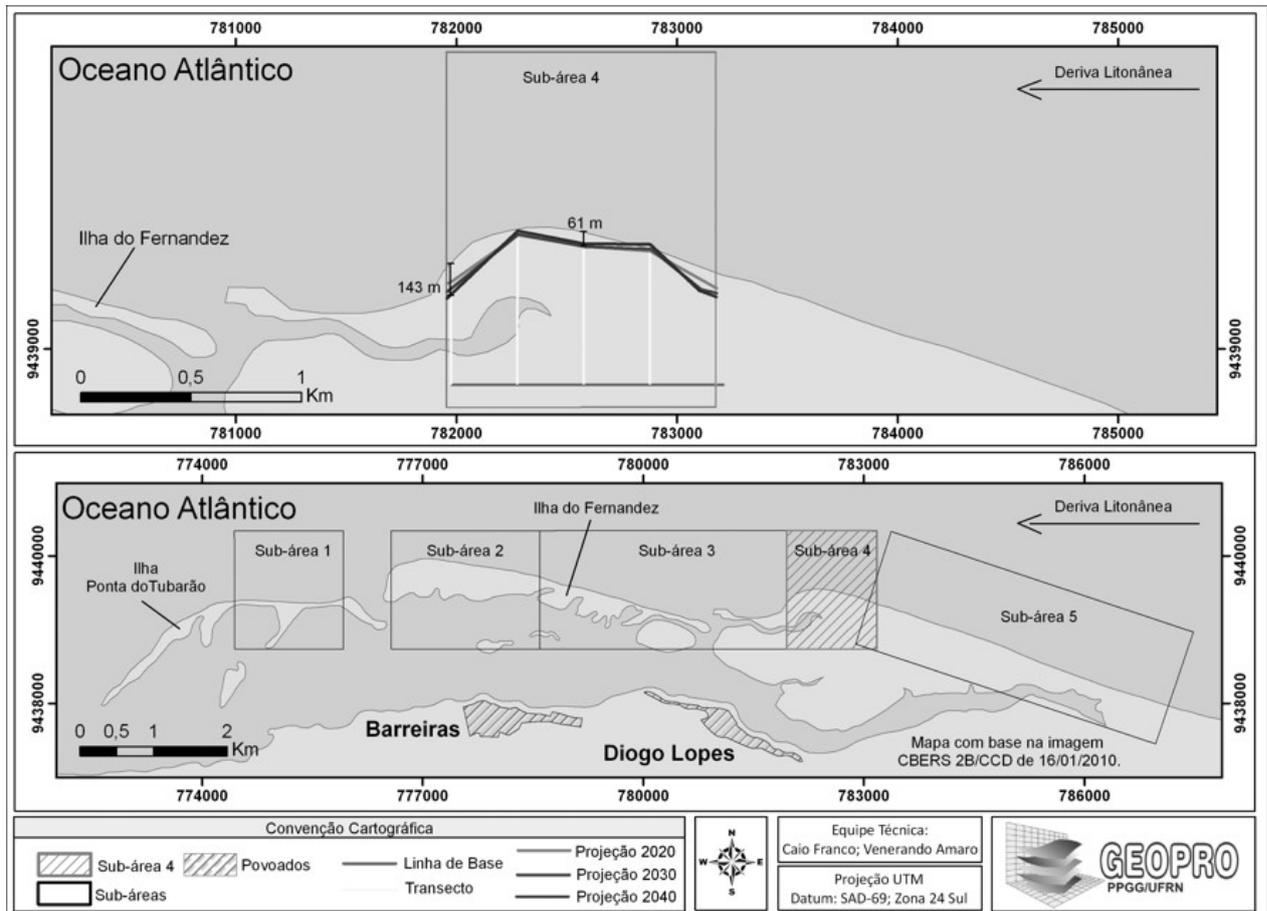


Figura 8 - Projeção do cálculo de regressão linear para o ano de 2020, 2030 e 2040 da Subárea 4, Barra Nova.

A Subárea 5, na porção extremo leste da área de estudo, apresentou valor de R2 médio de 0,80, para o intervalo de confiança de 95%. Representa uma porção de erosão menos intensa, sem grande influência dos canais de maré. A projeção também foi estimada para os anos de 2020, 2030 e 2040 (Figura 9). Entretanto, o principal fato de alteração na conformação nesse trecho do litoral é a abertura de canais de maré expondo as áreas abrigadas do Estuário de Diogo Lopes o mar aberto, devido à perda de área no sentido NE-SW de 100 m de faixa de praia por década, sendo no ano de 2020 estimada erosão de 130m, erosão de 238 m em 2030 e erosão de 307 metros em 2040, aproximadamente (Figura 10).

4.2. Modelagem dos Cenários Futuros

Após a projeção futuras das subáreas, foi elaborada a visualização integral dos cenários futuros para a área de estudo, considerando-se aspectos de interpretação geológica e geomorfológica, e, tendo como base, as linhas de projeções sobrepostas à imagem de alta resolução do sensor multiespectral *High Resolution Visible Infrared* (HRVIR) a bordo do satélite SPOT-5 do ano de 2007. Os cenários incluem as principais unidades geoambientais da área de estudo: manguezais, dunas fixas e móveis, faixas de praias, canais de maré e substratos rochosos.

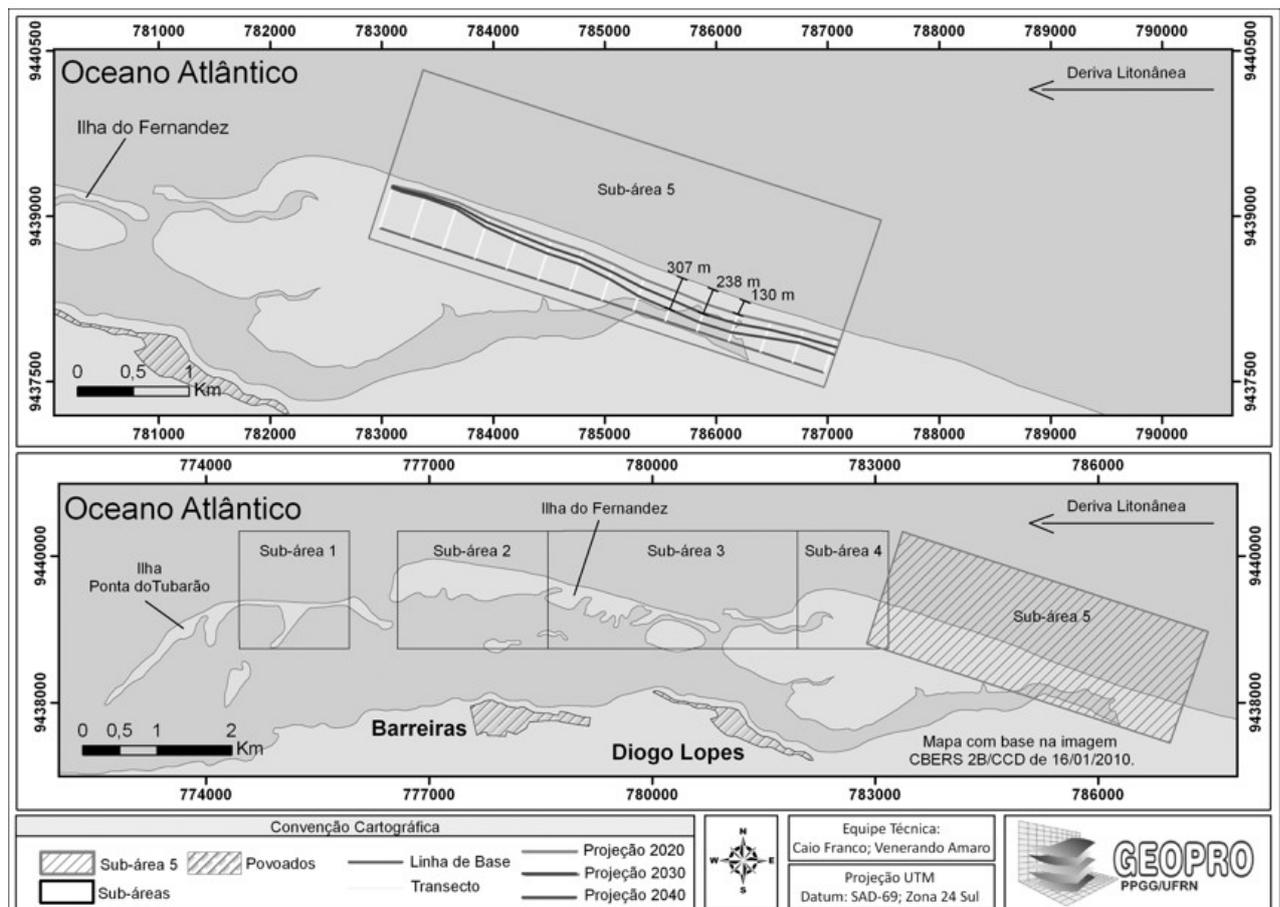


Figura 9 - Projeção do cálculo de regressão linear para o ano de 2020, 2030 e 2040 da Subárea 5.



Figura 10 - Fotografia aérea de pequeno formato, com visada E-W da subárea 5, em representação esquemática da projeção da linha de costa prevista para 2020, 2030 e 2040, com recuos de 170 m, 258 m e 281 m, respectivamente, no sentido NE-SW. Fonte: GEOPRO/UFRN.

Cenário em 2020

Na análise da Figura 11 observa-se que em 2020 a Ilha Barreira Ponta do Tubarão desaparecerá, como constatada em trabalhos anteriores (SOUTO, 2004; SOUTO, 2009; NASCIMENTO, 2009). A ilha barreira serve de abrigo natural para o Estuário de Diogo Lopes, com florestas de manguezal, e da faixa de praia de Soledade onde estão inseridos os Campos Petrolíferos de Macau e Serra. Assim, com o desaparecimento da ilha barreira ocorrerá a exposição total das florestas de manguezal remanescentes e da Praia de Soledade que ficarão sujeitas ao contato direto com as forças hidrodinâmicas de mar aberto, aumentando o impacto de ondas e correntes de maré, o que acarretará aumento acentuado do processo erosivo.

A Ilha do Fernandez sofrerá um recuo de cerca de 250 m no sentido N-S da porção em contato com mar aberto. Esse recuo causará a fragmentação dividindo-a em diversos segmentos mantendo a geometria original alongada

e subparalela à linha de costa. Este processo promoverá o alargamento do canal de maré entre a Ilha dos Ratos e a Barra Nova. Contudo, devido a exposição da Ilha do Rato ao mar aberto, a vegetação de manguezal estará comprometida e deverá entrar em colapso ou expressar uma tendência de reajuste de espécies mais adequadas às novas condições de salinidade, acidez do solo e energia, ocasionadas pela ação das ondas e das correntes, que transportam sedimentos praial sobre as raízes da vegetação. Porém o substrato lamoso mantido pela vegetação de manguezal pode auxiliar na resistência ao processo erosivo da ilha, inclusive atuando como trapa no aprisionamento do sedimento transportado pela deriva litorânea.

A Barra Nova, não sofrerá grandes modificações na sua geometria, pois os resultados geostatísticos não mostraram mudanças significativas. Esta região encontra-se em cota altimétrica ligeiramente mais elevada, o que favorece

o acúmulo e preservação dos sedimentos nesse trecho de praia. O trecho de linha de costa entre a Barra Nova e a Praia do Minhoto sofrerá recuo de aproximadamente 100 m, removendo grande parte dos sedimentos oriundos dos depósitos de praia e os eólicos de pós-praia. O modelo não permite estimar se esses sedimentos erodidos serão depositados ao longo da costa, no sentido da deriva litorânea, mas considerando-se a direção preferencial dos ventos na região, grande

volume material será lançado nos canais de maré do Estuário de Diogo Lopes produzindo o assoreamento das drenagens e a mudança química do substrato. No entanto, nas observações multitemporais para as décadas anteriores, os sedimentos erodidos desta área não são suficientes para equilibrarem o balanço sedimentar das áreas na porção mais a oeste (SOUTO, 2009; NASCIMENTO, 2009).

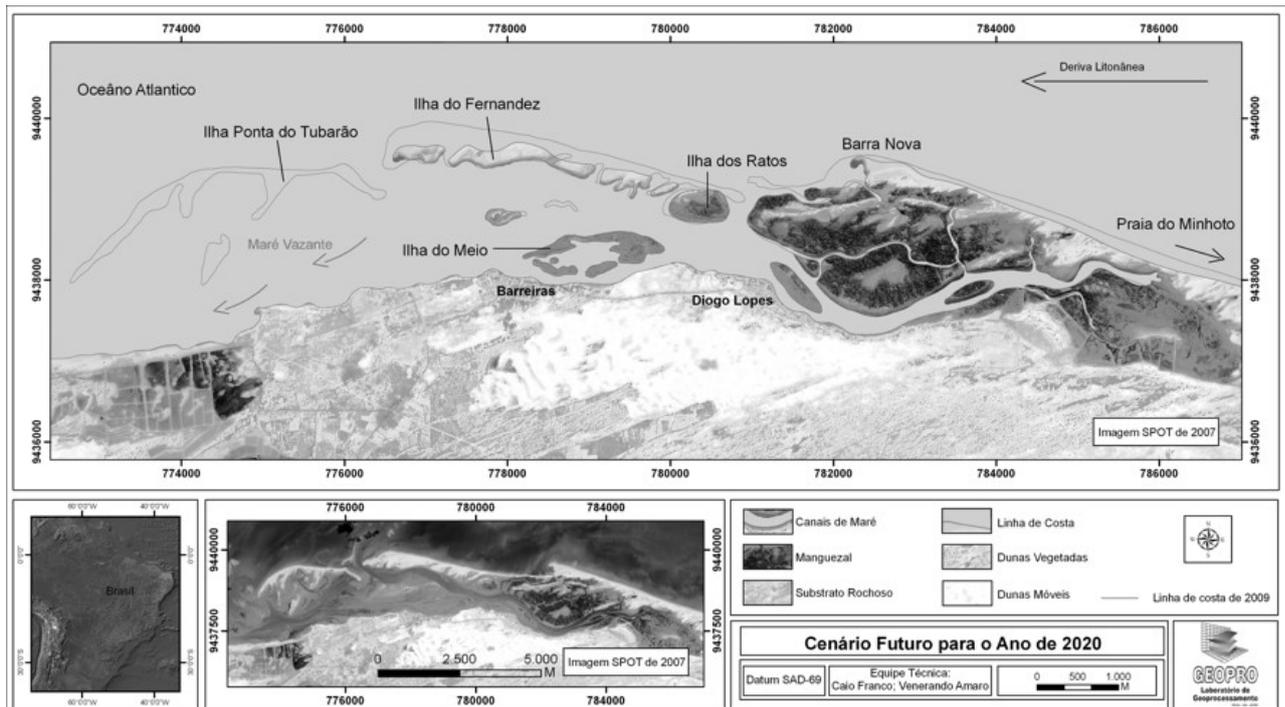


Figura 11 - Cenário previsto para o ano de 2020.

Cenário em 2030

O cenário previsto para 2030 (Figura 12) mostra-se semelhante ao anterior, com a contínua erosão da Ilha do Fernandez. Contudo, o modelo permite estimar a fragmentação da Ilha do Fernandez em segmentos menores de ilhas barreiras e barras arenosas. A abertura e migração lateral (de leste para oeste) de canais de maré assemelha-se ao padrão já observado para os anos de 1889 e 1978, inferindo o início de um novo ciclo de surgimento de ilhas

barreiras, o que remete a um ciclo maior de fechamentos/aberturas de barras arenosas em aproximadamente 50 (cinquenta) a 90 (noventa) anos, mas ainda pouco conclusivo. A Ilha do Fernandez continuará sofrendo erosão, com um recuo de aproximadamente 300 m para o ano de 2030, reduzindo sua largura, e concomitantemente promovendo o alargamento dos canais de maré adjacentes às ilhas/barras arenosas fragmentadas.

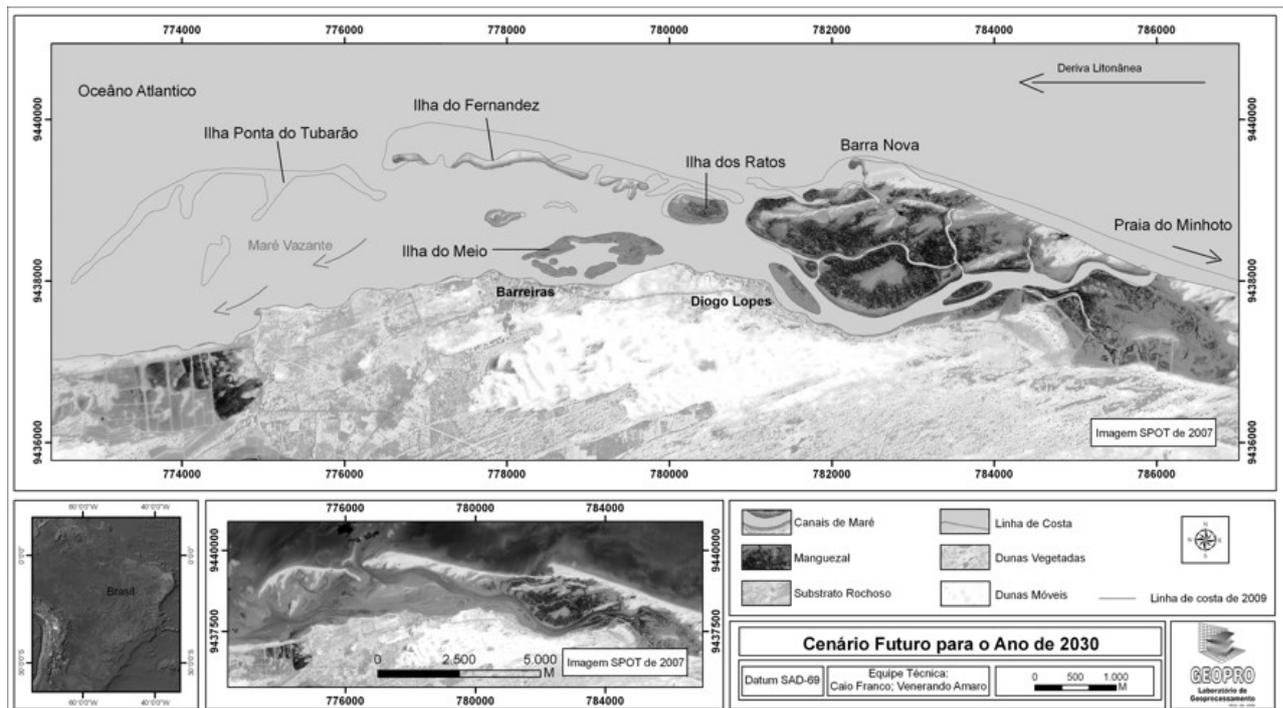


Figura 12 - Cenário previsto para o ano de 2030.

A Ilha dos Ratos sofrerá assoreamento em todo o seu raio com mortandade da vegetação e diminuição significativa da porção que tem contato direto com o mar aberto.

A Barra Nova permanecerá sem grandes modificações, mas o crescimento lateral na direção oeste deverá permanecer inalterado, estendendo-se de maneira que se forme um novo esporão arenoso pela deposição dos sedimentos carreados pela deriva litorânea, semelhante à geometria atual da Ilha do Fernandez.

Na faixa de praia entre a Barra Nova e a Praia do Minhoto, sofrerá um estreitamento da no sentido N-S, ocarretando a abertura de novos canais de maré, expondo o Estuário de Diogo Lopes ao mar aberto, formando uma grande ilha, em parte protegida na porção lagunar pela cobertura vegetal de manguezal, e faixa de sedimentos praias assoreando a vegetação mais próxima da linha de costa, como já se observa em alguns trechos de ilhas sujeitas à ação direta do mar aberto.

Cenário em 2040

O cenário de 2040 apresenta-se como o mais drástico (Figura 13), pois as ilhas barreiras Ponta do Tubarão e do Fernandez terão sido erodidas por completo, deixando a porção oeste em contato direto com as falésias do Tabuleiro Costeiro (região conhecida como Falésia do Chico Martins), na parte continental de substrato rochoso da área de estudo. Isso implicará na redução significativa do sistema lagunar-estuarino, comprometendo o ecossistema manguezal, as comunidades pesqueiras, as atividades salineiras, de carcinicultura e petrolífera existentes na região. Os distritos de Barreiras, Diogo Lopes e a comunidade de Sertãozinho serão parcialmente inundadas, como já se observa ultimamente, e estarão submetidas aos intensos processos costeiros influenciado pela alta energia das ondas e marés. Todo o manguezal da Ilha dos Ratos e a Ilha do Meio estarão comprometidos de maneira que restarão apenas resquícios de vegetação de manguezal e a exposição cada vez maior

de área lamosa, típicos da base desses depósitos encontrados na região.

A Barra Nova terá recuo de 61 m, porém deverá mudar a geometria do

litoral em relação ao ano de 2020 e 2030, possivelmente apresentará migração lateral, para oeste-noroeste, decorrente das correntes de deriva litorânea.

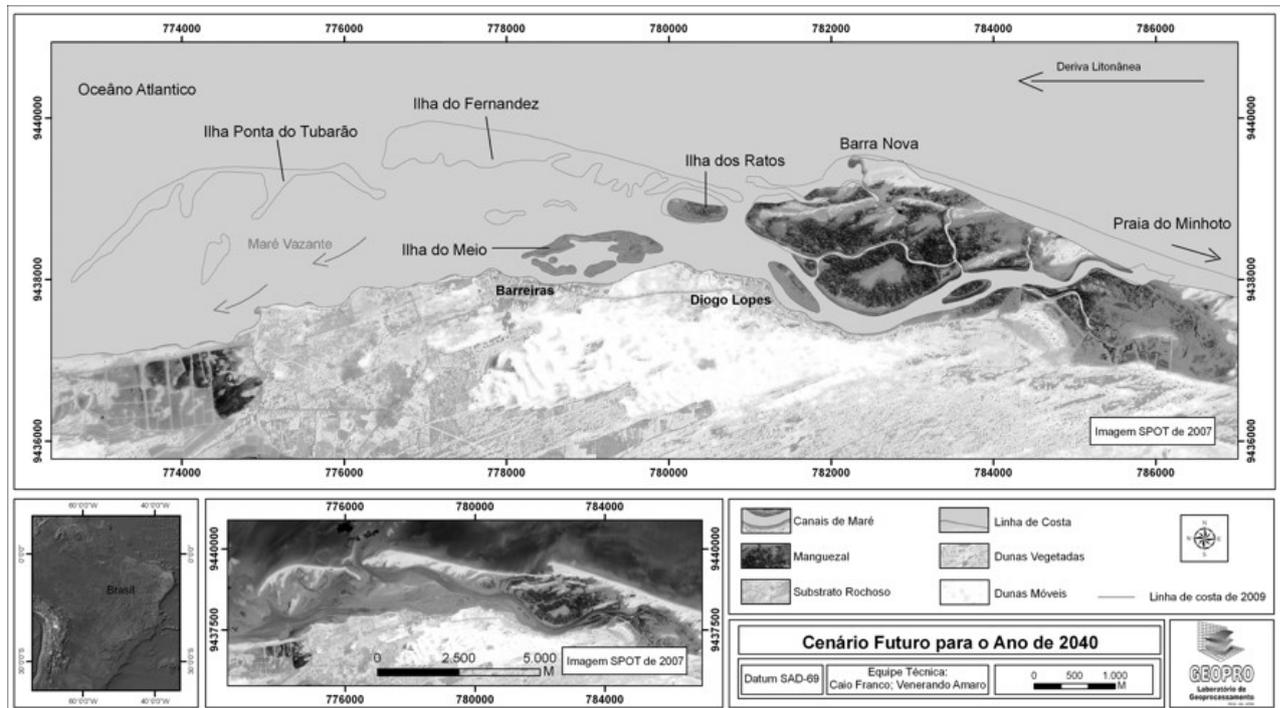


Figura 13 - Cenário previsto para o ano de 2040.

Na porção oeste da Praia do Minhoto, ocorrerá a erosão por completo dos depósitos eólicos e de praia, atingindo posteriormente os depósitos eólicos vegetados. O canal aberto em 2030 sofrerá um alargamento elevando o fluxo das marés de enchente e vazante, além do assoreamento com os sedimentos transportados nesse fluxo, contribuindo para o contínuo processo de degradação do sistema estuarino. A perda de área costeira e de cobertura vegetal desse sistema causará instabilidade mais acentuada da zona costeira e perda de biodiversidade marinha da área de estudo.

Vale ressaltar que na elaboração desse estudo não foi incluído diretamente nenhuma sugestão de variáveis referentes ao aumento do nível médio do mar que se espera para esse século. Essa variação pode alcançar de 1,0 a 6,0 metros até o final de 2.100, dependendo

da região do planeta (ROWLEY *et al.*, 2007). Caso isso se confirme, a área de estudo estará em risco e com consequente aceleração do prognóstico apresentado, que foi baseado exclusivamente na análise evolutiva das linhas de praia.

5. CONCLUSÕES

O uso de ferramentas de geoprocessamento e modelos geoestatísticos dos algoritmos do DSAS permitiram a elaboração de prognósticos e cenários futuros baseados na mudança de linhas de costa adaptadas à área de estudo, com base na análise de dados adquiridos nos períodos de 1954 a 2009. A previsão de mudanças depende da quantidade e qualidade das informações dos trechos de litoral em datas pretéritas. A análise entre 1954 a 2009 mostrou claramente indícios de contínuo processo de erosão, intensificado na década de 70.

Na análise de 2000 a 2009 as ilhas da Ponta do Tubarão e Fernandez apresentaram erosão contínua, sendo a primeira ilha a que demonstrou erosão mais acentuada.

As subáreas 1, 2 e 3 foram as que apresentaram trechos de maior risco a erosão, devido a grande fragilidade das ilhas barreiras e barras arenosas diante das mudanças das condições ambientais. As subáreas 4 e 5 apresentaram menores riscos, porém mesmo susceptíveis a sofrerem o efeitos de erosão costeira em menor proporção a posição geográfica a montante do Estuário de Diogo Lopes, favoreceria a abertura de canais de maré que submeteriam o estuário à ação direta do mar aberto.

Na Subárea 1 a projeção para 2020 da linha de costa irá recuar, aproximadamente 360 m, no sentido N-S. A Subárea 2 recuará 283 m em 2020, 308 m em 2030 e 496 m no anos de 2040, que acarretará no desaparecimento da Ilha do Fernandez em 2040. Na Subárea 3 perderá a faixa de praia em 170 m no ano de 2020, 258 m em 2030 e o desaparecimento total da ilha barreira em 2040. Na Subárea 5 haverá erosão de 130m de faixa de praia em 2020, 238 m no ano de 2030 e de 307 m em 2040, todas no sentido de nordeste para sudoeste. A Subárea 4 foi a que se apresentou mais estável ao processos de erosão, perdendo somente 61 m em 2020 e 2030, e 143 m em 2040.

Portanto, as simulações resultam no prognóstico da linha de costa e indicam erosão de praia e, consequentemente, o desaparecimento das ilhas barreiras Ponta do Tubarão e Fernandez num período futuro de no máximo 20-30 anos. Os fatores antrópicos e agentes naturais relacionados aos processos costeiros e a elevação do nível do mar influenciarão na diminuição drástica e ainda maior desse trecho da área de

estudo.

A região estuarina da RDSPT permanecerá protegida nos próximos 20 anos, porém, devido à erosão das ilhas barreiras, os ecossistemas estuarinos locais estarão comprometidos. A perda de área costeira e de cobertura vegetal do sistema estuarino causará instabilidades cada vez mais acentuadas da zona costeira e perda de biodiversidade marinha.

As projeções futuras da linha de costa servem para demarcar as áreas mais susceptíveis às mudanças na conformação do litoral. O modelo não permite estimar a formação de novas ilhas barreiras, nem mesmo projetar a variação lateral das ilhas, uma limitação do modelo. Contudo, interpretações podem ser sugeridas diante de fatores geológicos e geomorfológicos observados nas diversas linhas de costa pretéritas da região (NASCIMENTO, 2009). As projeções da linha de costa das subáreas 3, 4 e 5 contribuíram com o fortalecimento da existência de uma cota topográfica suavemente mais elevada na Subárea 4 em relação as demais subáreas, corroborando com o modelo estrutural proposto por Souto (2009).

Com a integração dos mapas das linhas de costa e cenários futuros, mapas altimétricos, de uso e ocupação do solo, geologia, geomorfologia, mapas de sensibilidade ambiental, entre outros, é possível a elaboração de mapas de risco para a área de estudo (BOORI & AMARO, 2011). A esses elementos acrescenta-se o fato de que as zonas costeiras, já superexploradas, continuam sob uma grande investida econômica, o que aumenta a possibilidade de poluição por resíduos urbanos, industriais e agrícolas sem tratamento. Os rios conduzem cada vez mais poluentes, incluindo produtos químicos e metais pesados, juntamente com o aumento da carga de sedimentos

devido ao processo erosivo nas áreas estuarinas interiores e da desertificação. Nicholls et al. (1999) e Nicholls (2002) sugeriram o agravamento dessa situação nas planícies costeiras, de uso tanto agrícola como urbano, com o crescimento da população.

Portanto, a elaboração de prognósticos de modificação da linha de costa são subsídios relevantes às estratégias de gestão da zona costeira elaboradas no presente, que podem alterar a natureza dos riscos e avaliar as adaptações mais adequadas para atender as comunidades atuais e futuras que ocupem a zona costeira, considerando os diversos parâmetros físicos envolvidos na análise de riscos futuros, como as alterações nos regimes climáticos e a elevação do nível do mar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMARO, V.E.; ARAÚJO, A.B. 2008. Análise Multitemporal da Morfodinâmica da Região Costeira Setentrional do Nordeste do Brasil entre os Municípios de Grossos e Tibau, Estado do Rio Grande do Norte. *Revista da Gestão Costeira Integrada*, V.8(2): 77-100.
- AMARO, V. E. 1998. Análise Conjunta de Dados Geológicos, Geofísicos e de Sensoriamento Remoto do Setor Extremo Nordeste da Província Borborema, Nordeste do Brasil, Com Ênfase nas Zonas de Cisalhamento Dúcteis Neoproterozóicas. Tese de Doutorado, USP, São Paulo, 401p.
- ANDRIOTTI, J.L.S. 2003. Fundamentos de Estatística e Geoestatística. Editora Unisinos.
- ARAÚJO, A. B. 2006. Análise e Caracterização da Dinâmica da Foz do Rio Apodi, Região de Areia Branca/RN, Com Base na Cartografia Temática Multitemporal de Produtos de Sensoriamento Remoto. Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Dissertação de Mestrado, 159p.
- BIJLSMA, L.; EHLER, C.N.; KLEIN, R.J.T.; KULSHRESTHA, S.M.; MCLEAN, R.F.; MIMURA, N.; NICHOLLS, R.J.; NURSE, L.A.; PÉREZ NIETO, H.; STAKHIV, E.Z.; TURNER, R.K.; WARRICK, R.A. 1996. Coastal zones and small islands. In: *Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses*, R.T. Watson, M.C. Zinyowera and R.H. Moss (eds.). Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, pp. 289-324.
- BOORI, M. S.; AMARO, V. E. 2010. Detecting and understanding drivers of natural and eco-environmental vulnerability due to hydro geophysical parameters, ecosystem and land use change through multispectral satellite data sets in Apodi estuarine, Northeast Brazil. *International Journal of Environmental Sciences*, v. 2, p. 125-139.
- BOORI, M. S.; AMARO, V. E. 2011. Natural and eco-environmental vulnerability assessment through multi-temporal satellite data sets in Apodi valley region, Northeast Brazil. *Journal of Geography and Regional Planning*, v. 4(4), pp. 216-230.
- CASTRO, A.F.; AMARO, V.E.; SOUTO, M.V.S.; GRIGIO, A.M.; FREITAS, C.C.M. 2010. Modeling and development of a computacional system for evaluation of the coastal dynamics of Macau area, Rio Grande do Norte State, Brazil. *Journal of Coastal Research*, v. 64, p. 1.
- CHAVES, M. S.; VITAL, H. 2001. Caracterização Geoambiental dos Parâmetros de Onda entre o trecho Praial da Ponta do Tubarão e Gamboa do Corta-Cachorro, Macau/RN. In: *ABEQUA*, 8, Imbé/RS, Anais, p. 55.
- CHAVES, M.S.; VITAL, H.; SILVEIRA, I.M. 2006. Beach morphodynamics of the Serra oil field, northeastern Brazil. *Journal of Coastal Research*, SI 39. p. 594-597.

- COHEN, J. E.; SMALL, C.; MELLINGER, A.; GALLUP, J.; SACHS, J. 1997. Estimates of coastal populations. *Science*, 278: 1211–1212.
- DOLAN, R.; FENSTER, M. S.; HOLME, S. J. 1991. Temporal analysis of shoreline recession and accretion. *Journal of Coastal Research*, 7(3), 723–744.
- GENZ, A.S.; FLERCHER, C. H.; DUNN, R.A.; FRAZER, L.N.; ROONEY, J.J. 2007. The predictive accuracy of shoreline change rate methods and alongshore beach variation on Maui, Hawaii: *Journal of Coastal Research*, v. 23, n. 1, pp. 87-105.
- GOOVAERTS, P. 1997. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Oxford University Press, NY.
- HEWITT, K. 1997. *Regions of Risk: A Geographical Introduction to Disasters*. Addison-Wesley Longman, Essex, United Kingdom, 389 pp.
- ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. 1989. *An Introduction to Applied Geostatistics*. Oxford University Press, New York.
- NASCIMENTO, M.C. 2009. A erosão costeira e sua influência sobre a atividade petrolífera: Alternativas sustentáveis na mitigação de impactos ambientais. 222p. Dissertação (Mestrado em Geofísica e Geodinâmica). Programa de Pós-graduação de Geofísica e Geodinâmica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN.
- NICHOLLS, R.J.; MIMURA, N. 1998. Regional issues raised by sea-level rise and their policy implications. *Climate Research*, 11, 5-18.
- NICHOLLS, R. J. 2002. Analysis of global impacts of sea-level rise: A case study of flooding. *Physics and Chemistry of the Earth*, 27:1455-1466.
- NICHOLLS, R.J.; HOOZEMANS, F.M.J.; MARCHAND, M. 1999. Increasing flood risk and wetland losses due to global sea-level rise: regional and global analyses. *Global Environmental Change*, 9:S69-S87.
- NIMER, E. 1972. Climatologia da Região Nordeste do Brasil – Introdução à Climatologia Dinâmica. *Revista Brasileira de Geografia*, Rio de Janeiro, 34(2): 3.51.
- RIOS, V.P.L. 2011. Caracterização dos Depósitos Sedimentares Holocênicos no Sistema de Ilhas Barreiras do Estuário Diogo Lopes, Litoral Setentrional do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil. Relatório de Graduação. Universidade Federal do Rio Grande do Norte / UFRN.
- ROWLEY, R.J.; KOSTELNICK, J.C.; BRAATEN, D.; LI, X.; MEISEL, J. 2007. Risk of Rising Sea Level to Population and Land Area. *Eos Transactions*, 88(9):105-107.
- SILVEIRA, I.M. 2002. Estudo evolutivo das condições ambientais da região costeira do Município de Guamaré - RN. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 81 p.
- SOUTO, M.V.S. 2009. Análise da Evolução Costeira do Litoral Setentrional do Estado do Rio Grande do Norte, Região Sob Influência da Indústria Petrolífera. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação de Geofísica e Geodinâmica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN.
- SOUTO, M.V.S. 2004. Análise multitemporal dos elementos geoambientais da Planície estuarina de Região da Ponta do Tubarão, área de influência dos campos petrolíferos de Macau e Serra, Município de Macau, RN. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 114p.
- THIELER, E.R.; HIMMELSTOSS, E.A.; ZICHICHI, J.L.; ERGUL, A. 2005. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0. An ArcGIS extension for calculating shoreline change: U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278.
- VALENTIM DA SILVA, D.R.; AMARO, V.E. 2008. Integração entre dados ópticos e radar (SRTM) para a caracterização geoambiental da costa setentrional do Rio Grande do Norte. *Revista Geográfica Acadêmica*, v.2, p. 111-123.