



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

*Northeast Geosciences Journal*

v. 7, nº 2 (2021)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2021v7n2ID21272>



## AVALIAÇÃO DE CURTO PRAZO DA RETRAÇÃO DAS FALÉSIAS DE TIBAU DO SUL-RN

Ada Cristina Scudeleri<sup>1</sup>; Maria de Fátima Alves de Matos<sup>2</sup>; Venerando Eustáquio Amaro<sup>3</sup>; Michel Rodrigues Camara<sup>4</sup>; Augusto César Chaves Cavalcante<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Engenheira Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal/RN, Brasil.

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7594-1196>.

Email: adaufrn@gmail.com.

<sup>2</sup>Geógrafa, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal/RN, Brasil.

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-2864-2027>.

Email: mfatimaalves.m@gmail.com.

<sup>3</sup>Geólogo, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal/RN, Brasil.

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7357-2200>.

Email: venerando.amaro@gmail.com.

<sup>4</sup>Geólogo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal/RN, Brasil.

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7421-6275>.

Email: rodcam1987@gmail.com.

<sup>5</sup>Engenheiro Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal/RN, Brasil.

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5687-3802>.

Email: augusto.cesar.pdf@gmail.com.

### Resumo

O objetivo deste artigo foi empregar as ferramentas de Geotecnologias, como o Processamento Digital de Imagens (PDI) do satélite de alta resolução espacial QUICKBIRD, a análise espacial em ambientes de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e os módulos estatísticos do Digital Shoreline Analysis System (DSAS) para identificar os setores litorâneos assinalados por falésias marinhas no município de Tibau do Sul/RN, e quantificar as taxas de retração entre os anos de 2003 a 2013. Os

resultados demonstraram que cerca de 34% da linha de costa do Município de Tibau do Sul, dominado por falésias, têm sofrido recuos expressivos. As maiores magnitudes de retração da borda das falésias ocorreram nos subsetores N2, C3 e S2, com recuo de 1,5m, 1,71m e 1,9m, respectivamente. O valor da constante LR<sup>2</sup> esteve mantido em todos os casos e foi maior que 0,75 sugerindo o processo erosivo linear instalado por toda a década avaliada. Deste modo, as ferramentas e métodos empregados servem como subsídios imprescindíveis aos estudos de identificação de processos erosivos costeiros e à construção de instrumentos de controle e gestão ambiental da zona costeira.

**Palavras-chave:** Geotecnologias; Erosão Costeira; DSAS.

### Abstract

#### SHORT-TERM EVALUATION OF RETREAT CLIFFS TIBAU SOUTH-RN

The objective of this article was to employ geotechnology tools, such as the Digital Image Processing (DIP) of the QUICKBIRD high-resolution satellite, spatial analysis in Geographic Information Systems (GIS) environments and the statistics modules of the Digital Shoreline Analysis System (DSAS), to identify the coastal sectors containing cliffs in Tibau do Sul, Rio Grande do Norte (RN) state, Brazil, and quantify the retreat rates between 2003 and 2013. The results showed that about 34% of the shoreline of Tibau do Sul, dominated by cliffs, has retreated significantly. The greatest cliff retreat occurred in subsectors N2, C3 and S2, with a decrease of 1.5, 1.71 and 1.9m, respectively. The constant value (LR<sup>2</sup>) was unchanged in all cases and greater than 0.75, suggesting a linear erosive process throughout the decade analyzed. Thus, the tools and methods used are essential subsidies for identifying coastal erosive processes and developing instruments for the control and environmental management of the coastal zone.

**Keywords:** Geotechnologies; Coastal Erosion; DSAS.

#### EVALUACIÓN A CORTO PLAZO DE LA RETIRACIÓN DE ACANTILADOS DE TIBAU DO SUL, RN

### Resumen

El objetivo de este artículo fue emplear herramientas de Geotecnología, como el Procesamiento Digital de Imágenes (PDI) del satélite QUICKBIRD de alta resolución, el análisis

espacial em entornos de sistemas de informação geográfica (GIS) y los módulos estadísticos del *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS) para identificar los sectores costeros marcados por acantilados marinos en el municipio de Tibau do Sul / RN, y cuantificar las tasas de retracción entre los años 2003 a 2013. Los resultados mostraron que alrededor del 34% de la costa del municipio de Tibau do Sul, dominado por acantilados, ha sufrido importantes retrocesos. Las mayores magnitudes de retracción del borde del acantilado ocurrieron en los subsectores N2, C3 y S2, con una disminución de 1.5 m, 1.71 m y 1.9 m, respectivamente. El valor de la constante  $LR^2$  se mantuvo en todos los casos y fue superior a 0,75, lo que sugiere el proceso erosivo lineal instalado a lo largo de la década evaluada. De esta manera, las herramientas y métodos utilizados sirven como subsidios esenciales para los estudios para identificar procesos erosivos costeros y para la construcción de instrumentos de control y gestión ambiental en la zona costera.

**Palabras-clave:** Geotecnologías; Erosión Costera; DSAS.

## 1. INTRODUÇÃO

A ocupação humana em zonas costeiras esteve sempre à margem dos ordenamentos territoriais e corresponde ao setor onde reside quase 25% da população mundial (SMALL e NICHOLLS, 2003). Quando se consideram as áreas contíguas às linhas de costa em altitudes até 10m acima do nível médio do mar, estas perfazem cerca de 2% da área terrestre mundial, mas comporta 10% da população mundial e 13% da população urbana mundial (MCGRANAHAN, et al. 2007). é importante reconhecer que uma alta concentração populacional reconhecidamente aumenta a vulnerabilidade ao aumento relativo do nível médio do mar e outros perigos conduzidos pelas forças motrizes costeiras, amplificadas pelos riscos das mudanças climáticas (NICHOLLS, 2004).

As falésias marinhas representam, segundo algumas estimativas, mais de 80% das linhas de costa do mundo, (EMERY e KUHN, 1982). No Estado do Rio Grande do Norte (RN) as falésias marinhas correspondem a cerca de 25% das linhas de costa, desde o município de Baía Formosa ao sul no litoral oriental, até o município de Tibau no limite noroeste do litoral setentrional do RN (VITAL et al., 2018). Os significativos eventos erosivos em alguns trechos dessas falésias do litoral oriental, o mais populoso do RN, têm sido estudados nas duas últimas décadas por Amaral (2001), Severo (2005; 2011), Santos Júnior et al. (2011); Souza Júnior (2013), Taquez (2017), Vital et al (2018) e Camara et al. (2019), entre outros.

A variedade de tipos de linhas de costa em todo o mundo sugere a multiplicidade de processos envolvidos na formação de falésias marinhas (EMERY e KUHN, 1982). A erosão em falésias marinhas se dá a partir da combinação intempérica complexa entre processos subaéreos e marinhos, enfraquecendo a integridade geológica e estrutural das falésias, acarretando à erosão gradual e os movimentos episódicos gravitacionais e de transportes de material (TRENHAILE, 1987; SUNAMURA, 1992). Tais processos incluem a abrasão por ondas, ação das chuvas, ação eólica, variações de temperatura, erosão bioquímica e biofísica que promovem a ação hidráulica e o intemperismo físico e químico dos litotipos constituintes das falésias

(SUNAMURA, 1992; MASSELINK et al., 2003; TRENHAILE, 2016; EARLIE et al., 2017).

A ação erosiva sobre as falésias ameaçam, frequentemente, as infraestruturas públicas e privadas instaladas e acarretam impactos aos setores socioeconômicos que exploram a orla marítima (GRIGGS et al., 2004). O aumento continuado da ocupação humana na orla marítima tem amplificado os problemas da erosão costeira e os destacado como de relevância global, que faz jus à maior atenção nos estudos científicos e de gestão costeira, principalmente devido à perda permanente de terras (MENTASCHI et al., 2018), sobretudo decorrente da elevação do nível médio do mar decorrente do aquecimento global (BIRD, 2008; DAVIDSON-ARNOTT, 2010;).

Os perigos e riscos para as atividades humanas em orlas marítimas com falésias marinhas, em decorrência da instabilidade geotécnica inerente a essas feições, tornaram-se um desafio relevante à gestão e ao monitoramento costeiro (CAI et al, 2009). É fato que são limitadas as informações sobre a estabilidade de encostas, a distribuição espacial histórica de deslizamentos de terra e as magnitudes da erosão costeira, que são importantes indicativos do potencial de deslizamentos de terra no futuro, para subsidiar decisões de gestores locais (FALL, 2009; SAROGLU e ALEXANDROU, 2016). A instabilidade de falésias marinhas ativas pode ser resumida em um único ciclo erosivo composto por quatro estágios, conforme Moore et al. (2010): o desprendimento das partículas ou blocos, o transporte através da falésia, a deposição na porção frontal da encosta e a remoção pelos agentes hidrodinâmicos.

O uso de ferramentas de Geotecnologias tem permitido analisar a evolução temporal das formas de relevo costeiro, quantificar a retração de bordas e os volumes de deslizamentos nas encostas, em diferentes escalas espaço-temporais, aprimorando o monitoramento costeiro e, com o provimento dessas informações quali-quantitativas, potencializando as análises de riscos e perigos associados à erosão costeira (AMARO et al., 2012; WILLIAMS et al., 2017). As séries temporais de imagens de Sensoriamento Remoto da orla marítima, por exemplo, têm permitido registrar as dinâmicas de alterações no uso e ocupação, estabelecer os graus de vulnerabilidade natural e ambiental, além de quantificar os processos erosivos (KIRK, 1975; AL-TAHIR e ALI, 2004; BOAK e TURNER, 2005; DAHDOUH-GUEDES et al., 2006; AMARO et al., 2012, BUSMAN et al., 2014; CAMARA et al., 2019).

Neste contexto, o objetivo deste artigo foi empregar ferramentas de Geotecnologias para identificar e quantificar as retrações nas bordas de falésias marinhas em setores da orla marítima do Município de Tibau do Sul/RN no período entre 2003 e 2013.

## 2. METODOLOGIA

O desenvolvimento metodológico envolveu a caracterização da área de estudo com vistas à análise evolutiva em escala temporal de uma década, entre 2003 e 2013, por meio do Processamento Digital de Imagens (PDI) de alta resolução espacial, identificação de linhas de costa em ambiente de Sistema de Informações Geográficas e análise espacial no software Digital Shoreline Analysis System (DSAS) para quantificar as taxas

médias de recuo e os setores com as maiores retrações de bordas de encostas (THIELER et al., 2009; PRUDÊNCIO, et al. 2019).

## 2.1. Caracterização da área de estudo

A área de estudo corresponde a aproximadamente 16 km de extensão de linha de costa no Município de Tibau do Sul, litoral oriental do RN, distante cerca de 60 km ao sul de Natal (Figura 1). A orla marítima possui condições de clima classificado como Zona Tropical de Verão Seco (As) no sistema Köppen-Geiger (ALVARES et al., 2013), com regime pluviométrico regular de período chuvoso entre os meses de março a agosto.

Os ventos são contínuos de baixa intensidade (média de 4,4 m/s) que sopram de SE e qualificados como ventos alísios de sudeste. O regime é de mesomares semidiurnas, com amplitudes médias de marés de sizígia da ordem de 2,2m e de quadratura com média de 1,1m. As ondas predominantes são de ESE em todas as estações do ano, com aumento na participação de ondas de E no verão. As alturas significativas variam entre 0,5m e 2,8m, com dominância de ondas inferiores a 1,6m, com períodos de picos entre 4s e 20s, mas prevalecendo aqueles inferiores a 8s. Tal configuração de fatores gera deriva litorânea continuada que transporta sedimentos de sul para norte.

Trata-se de setor litorâneo com ecossistemas de vultosa riqueza caracterizada pela presença de espécies de Mata Atlântica, restinga e cerrado.

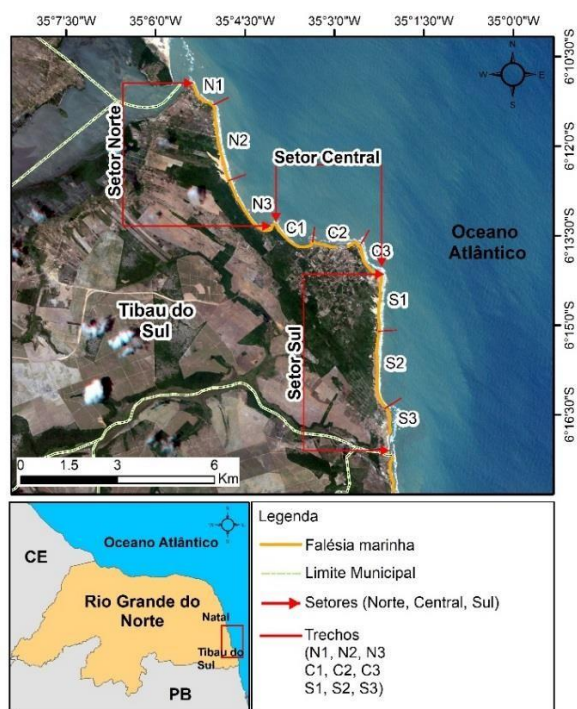


Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo, no Litoral Oriental do Rio Grande do Norte (RN).

O litoral oriental do RN se insere no contexto geológico da Plataforma de Natal, composta pelas sub-bacias sedimentares

marginais de Canguaretama e Natal, localizadas entre o Alto de Mamanguape a sul e o Alto de Touros a norte e sua plataforma continental contígua, que tem correlações estratigráficas com a Bacia Potiguar (LANA e ROESNER, 1999; FEITOSA et al., 2002; BARBOSA, et al. 2007). O contato a sul é feito com a Bacia Paraíba-Pernambuco pela falha de Mamanguape (BARBOSA et al., 2007). Evidências pautadas em mapas gravimétricos, sísmicos e testemunhagem de poços profundos sugerem que o embasamento cristalino da Plataforma Natal está mais raso do que na Bacia Paraíba-Pernambuco. A evolução geodinâmica dessas bacias costeiras da margem passiva brasileira, formadas na separação entre a América do Sul e a África durante o Mesozóico, e a sismicidade recente indicam que as reativações das zonas de cisalhamento pré-cambrianas de direção geral NNE-NE controlaram o rifteamento, a deposição sedimentar e a morfologia costeira (FERREIRA et al., 1998; BEZERRA et al. 2001). Neste contexto tectônico, a Plataforma de Natal é assinalada por estruturas em grábens e horsts de direções gerais NE (40o-60oAz) e NW (300o-320oAz), limitados por falhas que afetaram as unidades geológicas do embasamento, as unidades do Cretáceo, até a Formação Barreiras no Mioceno-Plioceno (BEZERRA et al., 2001).

As falésias marinhas deste estudo, delimitadas pelo gráben de Guarairas ao norte e pelo vale do rio Catu ao sul (Figura 1), compõem a borda da feição estrutural do tipo horst, que forma o bloco soerguido como tabuleiro costeiro de superfície aplainada da Formação Barreiras (BEZERRA et al., 2001). Como litotipos sedimentares predominam conglomerados, arenitos e argilitos que expõem sistemas deposicionais continentais, representados por sedimentos de leques aluviais e fluviais entrelaçados, gradantes para sistemas deposicionais marinhos. Os tabuleiros são dissecados por padrões angulares de drenagens e capeados por unidades do Quaternário que incluem terraços aluvionares e sedimentos eólicos (campos de dunas móveis e fixadas por vegetação) e, nas porções planas e baixas do relevo, por depósitos lagunares da Laguna de Guarairas e de manguezais, além depósitos praias e faixas de beachrocks alinhadas paralelamente à linha de costa (BEZERRA et al., 2001).

A intercalação entre os litotipos da Formação Barreiras predominantes nas falésias marinhas da área de estudo satisfazem à variação de fluxos energéticos no sistema deposicional de terrígenos, desde os fluxos de altas energias com níveis de conglomerados e areias grossas (Figura 2A), incluindo momentos de tempestades (Figura 2C), aos de baixas energias com a deposição de sedimentos finos como areias finas, siltitos e argilitos (Figura 2B). Além disso, os depósitos gravitacionais antigos e recentes ocorrem em diversos setores das falésias marinhas (Figura 2a), independente da magnitude da pressão antrópica. Tais depósitos de tálus/colúvio ocorrem limitados às bases das escarpas, compondo blocos de materiais rudáceos mal selecionados, característicos de movimentação de massa de material oriundo das falésias da Formação Barreiras (GOBBI e LADEIRA, 2011).

Os depósitos eólicos que capeiam os tabuleiros costeiros constituem os complexos dunares móveis e fixados por vegetação do tipo arbóreo arbustivo, no presente ocupados por agricultura intensiva. São constituídos por areias quartzosas de coloração esbranquiçadas, nos depósitos mais recentes e sem cobertura vegetal, à avermelhadas nos depósitos mais antigos, devido

à presença de argilas e óxidos de ferro (NOGUEIRA, 1975). Em ambos os tipos de depósitos eólicos, a granulometria é bem selecionada e dominam diâmetros de areia média nos grãos.

As faixas de beachrocks estão distribuídos paralelamente à linha de costa, com espessuras que variam de 10cm a 3,0m, larguras de dezenas de metros e comprimentos variados de dezenas de metros a alguns quilômetros, com mergulhos suaves em direção ao oceano. Os beachrocks são compostos predominantemente por litofácies arenitas de matriz quartzosa com estratificação cruzada tabular-planar e acanalada de baixo ângulo, arenitos conglomeráticos bioturbados e arenitos maciços, com cimentação carbonática, depositados em zona de ante-praia superior, mas atualmente dispostos em zona de intermaré e submersos (VIEIRA e DE ROS, 2006). Sobre os afloramentos de beachrocks são comuns feições erosionais, com bacias de dissolução e marmitas, pirâmides separadas por fendas e fraturamentos sugestivos de basculamentos por deslizamento gravitacionais, relacionados à erosão e variação do nível relativo do mar, pois recebem o impacto direto do padrão de arrebentação das ondas (BEZERRA et al. 2001).

Os depósitos praias compõem faixas extensas, estreitas e de declividade baixa a moderadas em direção do oceano, defrontantes às escarpas das falésias marinhas, constituídos por areias quartzosas, minerais pesados, fragmentos de rochas e bioclastos (NOGUEIRA et al., 1990). Nas porções retilíneas das praias a granulometria varia de areia média a grossa, enquanto nas porções curvilíneas a granulometria é de areia média a fina. A exceção é a praia de Simbaúma que recebe cargas de sedimentos provenientes do rio Catu carreados pela deriva litorânea. Faixas de praias arenosas estão ausentes nas bases dos promontórios, onde ocorrem os terraços de abrasão marinhos.

Quanto aos aspectos geomorfológicos, portanto, as feições prevalentes do relevo são: o tabuleiro costeiro com bordas em declives abruptos nas falésias marinhas, comumente com depósitos de tálus/cólúvio na base; a morfologia de baías em zeta com praias arenosas e promontórios com terraços de abrasão marinhos, evidentes em baixamares; os campos de dunas móveis e fixadas por vegetação; a planície fluvial do rio Catu; o Sistema Estuarino-Lagunar de Guarairas; e as planícies sublitorâneas com ausência de falésias.

Os tabuleiros costeiros encontra-se exumados (Figura 3A) pela atuação incessante de ventos alísios, pelos processos de lixiviação e pelas ações antropogênicas que, comumente, promove a perda do recobrimento vegetacional (SCUDELARI e FREIRE, 2005). As falésias marinhas ativas representam a borda escarpada dos tabuleiros costeiros, com desníveis de até 20m, submetidas à ação direta das forçantes hidrodinâmicas (Figura 3B). Quando recuadas, ocorrem capeadas por campos de dunas vegetadas e móveis (Figura 3C).

Morfologia marcante da planície costeira do litoral oriental são as baías parabólicas, ou em forma de zeta, decorrente da erosão diferencial dos litotipos da Formação Barreiras, em arcabouço estrutural de grábens e horsts alternados, sob a atuação erosiva das forçantes hidrodinâmicas, guiadas pelos padrões de refração e difração do clima de ondas dominantes provenientes de ESE (AMARAL, 2001). Os terraços de abrasão marinhos ocorrem em porções superiores à face de praia atual, na base da falésia marinha ativa, sugerindo uma maior alcance do nível

relativo do mar, provavelmente, relacionada ao último episódio interglacial.

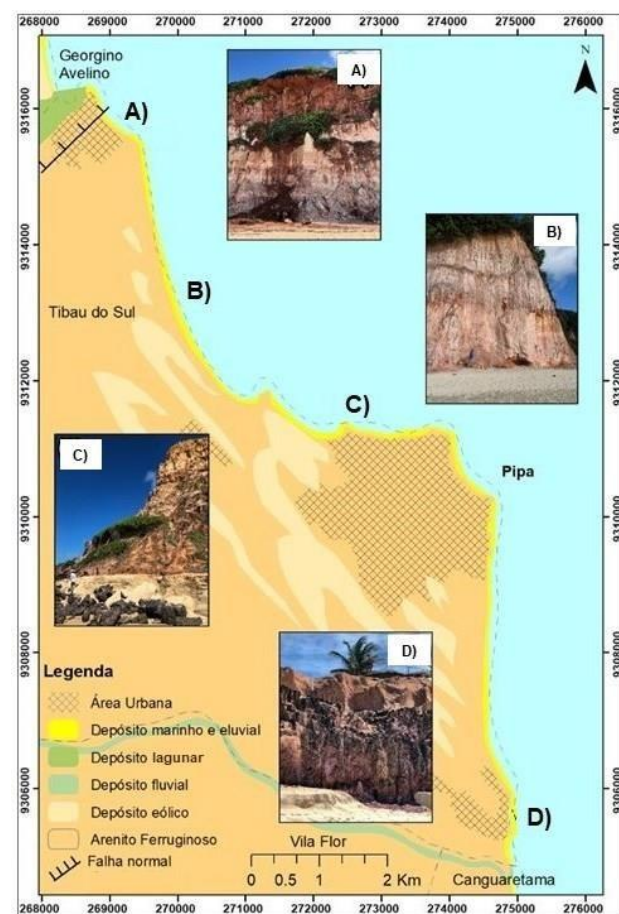


Figura 2 - Mapa simplificado da geologia da área de estudo: (A) Da base para o topo: intercalações de arenitos argilosos com níveis conglomeráticos a argilito maciço; depósitos de tálus; (B) Perfil com arenito conglomerático na base, a argilito arenoso e argilito maciço no topo; (C) Perfil com arenitos conglomeráticos na base, gradando para arenito argiloso no topo, com níveis conglomeráticos; (D) Da base para o topo: arenito conglomerático, arenito argiloso e arenito arenoso no topo, recoberto com solo.

As praias arenosas, usualmente protegidas pelas faixas alongadas de beachrocks, são do tipo intermediárias (WRIGHT e SHORT, 1983; CALLIARI et al. 2003), com atributos como a granulometria entre areia média e grossa, a inclinação baixa a moderada da face de praia (Figura 3c), que é marcada por feições como cúspides praias e correntes de retorno, diante da atuação do regime de mesomarés e do clima de ondas.

As dunas sucedem com dimensões desde pequeno porte, designadas de dunas embrionárias, com vegetação incipiente, recobrimdo a zona de pós-praia, os terraços marinhos e o sopé das falésias marinhas (Figura 3d). Dunas parabólicas e blowout de grandes dimensões ocorrem recobrimdo os topos dos tabuleiros costeiros e, ainda interligadas à praia, em processo de

cavalgamento sobre as falésias (Figura 3c), com vegetação arbóreo arbustivo de maior porte que abriga espécies de Mata Atlântica, caatinga e cerrado (AMARAL, 2001; PIERRI, 2008).

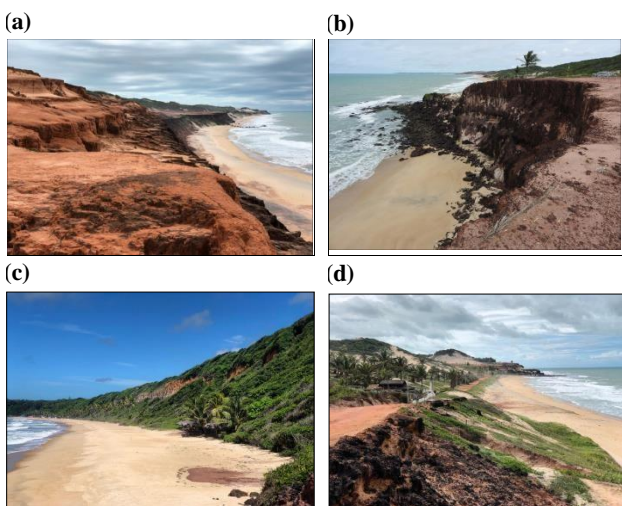


Figura 3 - Feições geomorfológicas do litoral oriental do RN: (a) Tabuleiro costeiro exumado e sem vegetação, com borda abrupta em falésia marinha ativa; (b) Falésia marinha ativa com borda escarpada e amplo desnível, com base de promontório recoberto por depósitos de tálus e submetidas à ação direta das ondas, e praia arenosa de inclinação moderada; (c) Falésia recuada com escarpa recoberta por vegetação; (d) Formação de dunas embrionárias e frontais, com vegetação incipiente, cavalgando sobre as falésias marinhas.

## 2.2. Análise Multitemporal de Imagens

A análise multitemporal de imagens do satélite QUICKBIRD, de alta resolução espacial, foi estruturada em três etapas distintas (Figura 4, 5 e 6): a primeira etapa abrangeu a seleção e o pré-processamento das imagens; a segunda etapa contemplou a aplicação das técnicas de PDI, para a identificação e extração das linhas de costa, assinaladas pelas bordas das escarpas de falésias; e, a terceira etapa baseou-se na análise da evolução das linhas de costa com uso dos módulos estatísticos do DSAS, o Linear Regression Rate (LRR), o End Point Rate (EPR) e o Net Shoreline Movement (NSM). O LRR define a taxa de variação do conjunto de linhas de costa com base em regressão linear simples, enquanto o NSM avalia a mobilidade no dado período de tempo, pela mensuração da distância entre a linha de costa mais antiga e a mais recente, e o EPR provê a taxa média de variação da linha de costa num dado intervalo de tempo.

Na primeira etapa foram selecionadas as imagens multiespectrais do visível e infravermelho próximo do satélite QUICKBIRD, com resolução espacial nominal de 2,5 m e imageamentos nos anos de 2003, 2008 e 2013, em períodos com baixas cobertura de nuvens e condições similares de marés (Figura 4, Tabela 1). A correção geométrica das imagens foram baseadas em equação polinomial quadrática e ortoretificação

incluindo pontos de controle no terreno (sigla em inglês GCP, de Ground Control Points) obtidos em levantamentos geodésicos.

A Tabela 1 apresenta os modelos matemáticos e erros acumulados usados no georreferenciamento. Como sistema de coordenadas foi utilizado a projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), Zona 25-Sul e datum SIRGAS 2000. A importância dessa etapa é ampliar os realces espectrais entre os feições em superfície, reduzindo as distorções e as imperfeições nas imagens multiespectrais (AGRAWAL; SARUP, 2011).

Tabela 1 - Características das imagens multiespectrais ópticas do satélite QUICKBIRD e dos referenciais adotados no procedimentos de análise.

Satélite	QUICKBIRD		
Data de Imageamento	12/08/2003	05/05/2008	12/03/2013
Resolução Espacial (m)	2,5	2,5	2,5
Correção Geométrica	Polinomial quadrático	Polinomial quadrático	Polinomial quadrático
Erro acumulado (m)#	0,577/4,584	0,679/3,489	0,679/3,489

#Erro acumulado (m): valor após georreferenciamento/valor original

Na correção atmosférica foi adotado o método empírico do pixel escuro (sigla em inglês DOS, de Dark Object Subtraction) com vistas a reduzir o efeito do espalhamento atmosférico e ampliar, assim, a qualidade do brilho nos diferentes pontos das imagens (CHAVEZ JR., 1988; 1996) propiciando maior contraste na identificação visual das bordas escarpadas das falésias marinhas.

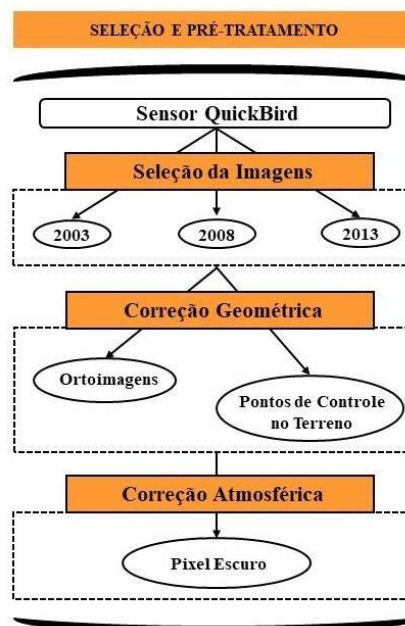


Figura 4 - Fluxograma da primeira etapa: seleção e procedimentos envolvidos no pré-processamento de imagens multiespectrais de alta resolução do satélite QUICKBIRD.

Na segunda etapa foram empregados tratamentos de PDI (Figura 5) para o realce dos contatos entre as litologias da Formação Barreiras, dominantes nas falésias, os tipos de vegetação e os campos de dunas móveis, facilitando ainda a delimitação das bordas das falésias. Os realces espectrais utilizados foram ampliações histográficas lineares e não-lineares de contrastes pixel a pixel das composições coloridas no sistema aditivo de cores vermelho-verde-azul (sigla em inglês RGB, de Red-Green-Blue) em cores verdadeiras e falsa cor.

Na análise multitemporal aplicou-se a estratégia de mapeamento das mudanças de linha de borda das falésias marinhas com foco básico na identificação, análise e interpretação das linhas de borda, seguindo os métodos descritos por Fletcher et al. (1997), Batista et al. (2009) e Amaro et al. (2012). Como referência para detecção da linha de borda nas imagens de satélite foi definido a borda superior das escarpas rochosas da Formação Barreiras, em contraste com os sedimentos eólicos, praias e os terraços de abrasão. Tal interpretação nas imagens de satélites foi, posteriormente, confirmada por verificação *in loco*, além da descrição das características erosionais nos diferentes setores das falésias.

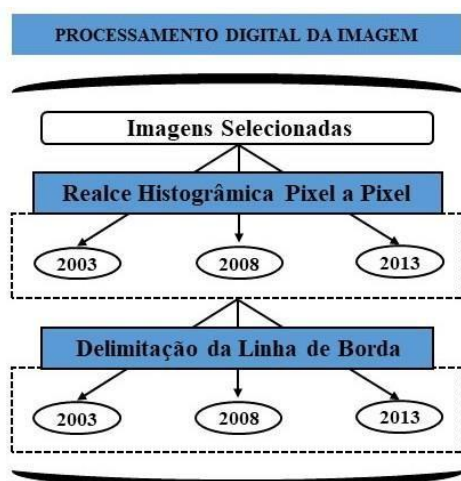


Figura 5 - Fluxograma da segunda etapa: principais tratamentos de PDI para realce e delimitação das bordas das falésias marinhas.

Na terceira etapa foram quantificadas as taxas de recuo em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG) com base nos módulos estatísticos do DSAS (Figura 6), extensão do software ArcGIS (THIELER et al., 2009). O DSAS foi executado em cinco fases (HIMMELSTOSS et al., 2018): (1) detecção de linhas de borda das falésias para as imagens multitemporais; (2) definição da linha de base que acompanha a tendência geral da linha de costa; (3) demarcação de transectos ortogonais à linha de base, posicionados em intervalos de 10m; (4) cálculo de distâncias entre linha de base e linhas de borda em cada transecto;

(5) cálculo de taxa de variação das linhas de borda. Portanto, os atributos das diferenças entre as linhas de borda entre cada uma das imagens foi calculada com base em 1.153 transectos, separados em três setores distintos: Norte, Central e Sul. Os resultados dos cálculos da taxa de variação de recuo das falésias, as taxas máxima, média e mínima foram agrupados para os setores (Norte, Central e Sul) do litoral de Tibau do Sul.

Na quantificação da taxa de recuo no decorrer do tempo e demais cálculos de variação das linhas de borda no DSAS, foram envolvidos os três métodos estatísticos, LRR, NSM E EPR, expressos em metros/ano (m/ano) e metros (m), como indica a Figura 6.

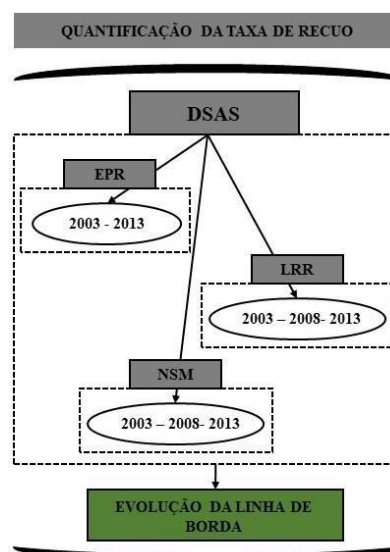


Figura 6 - Fluxograma da terceira etapa: módulos estatísticos do DSAS usados na quantificação das taxas de retração das bordas das falésias marinhas.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

No geral, a taxa média de retração para o litoral do Município de Tibau do Sul entre 2003 e 2013 foi de -0,442 m/ano, assinalando que 37% de linhas de costa distintas por falésias marinhas esteve submetida a erosão. Em comparação a alguns estudos recentes, similares na abordagem metodológica e nas análises de curto prazo temporal, destaca-se como taxa de recuo expressivamente alta, a exemplo da costa sul e central da Califórnia (EUA) com -0,044 m/ano (YOUNG, 2018), e de setores da costa francesa com recuo de -0,060m/ano a -0,390 m/ano (LOPEZ-SAEZ et al., 2018).

As taxas de retração altas demarcam, diretamente, a erosão diferencial em bordas de falésias marinhas ativas (Tabela 2). Entretanto, para alguns dos setores avaliados considera-se, no incremento das taxas de erosão, o intenso escoamento decorrente da erosão pluvial, sobretudo sobre as falésias marinhas exumadas.

Tabela 2 - Taxas média e máxima de retração em m/ano e o montante total entre os anos de 2003 e 2013 nas falésias nos setores litorâneos do Município de Tibau do Sul.

Setores	Setor Norte	Setor Central	Setor Sul
Taxa média (m/ano)	-0,22	-0,14	-0,12
Taxa máxima (m/ano)	-1,64	-2,15	-2,14
Retração máxima (m)	16,23	21,31	21,09
Extensão (km)	4,08	3,04	4,41
Recuo (%)	58	30	21

### 3.1. Setor Norte

No Setor Norte ocorreram as modificações mais significativas nas falésias marinhas (Figura 7). De cerca de 4,1 km de falésias, em 58% ocorreu retração, com taxa média de retração de -0,22 m/ano, na década avaliada. Decompostos em três subsetores (N1, N2, N3), em consonância com a direção geral da geometria da linha de costa, destaca-se que no subsetor N2 (Figura 7A-N2), porção central do Setor Norte, incidiu o maior percentual de taxa de retração em 82% de área, com a taxa máxima de aproximadamente -1,64 m/ano.

A Figura 7B mostra os transectos com as maiores taxas de retração, com destaque para o transecto T212 que mostrou recuo máximo de 16,23 m na década. Esse trecho da falésia é caracterizado por praia com declividade moderada e escarpa com incisão e movimento gravitacional de material intensificado pelo escoamento superficial (Figura 7C). Estudos geotécnicos prévios indicaram a forte instabilidade do talude neste trecho, a intensa erosão pluvial e os escorregamentos do material (solo e rochas) da porção superior, sugerindo baixa resistência da falésia devido à menor cimentação da camada superficial (SEVERO, 2005). Trabalhos de Braga (2005) e Camara (2018), mostraram a intensa e pervasiva erosão pluvial nesse setor de elevada exumação, provocando a formação de extensas voçorocas tanto no topo como na face escarpada da falésia.

Embora, este setor possua baixa ocupação por empreendimentos e áreas urbanas, a estrada de acesso aos principais pontos de interesse foi instalada muito próxima da borda da falésia marinha (Figura 7B). Portanto, a retirada da vegetação para instalação de quaisquer infraestruturas favorece a intensificação dos processos erosivos.

### 3.2. Setor Central

O Setor Central possui extensão de cerca de 3,04 km de bordas de falésias e desse montante apenas 30% esteve submetido a retração, o restante permanecendo estável no período entre 2003 e 2013. Os resultados para este setor (Figura 8) relevaram taxa média de retração de -0,14 m/ano, inferior àquela do Setor Norte, sobretudo, porque neste setor está a maior densidade populacional e de ocupação turística do Município de Tibau do Sul, na praia de Pipa, que possui vários trechos com obras de proteção costeira contra os processos erosivos.

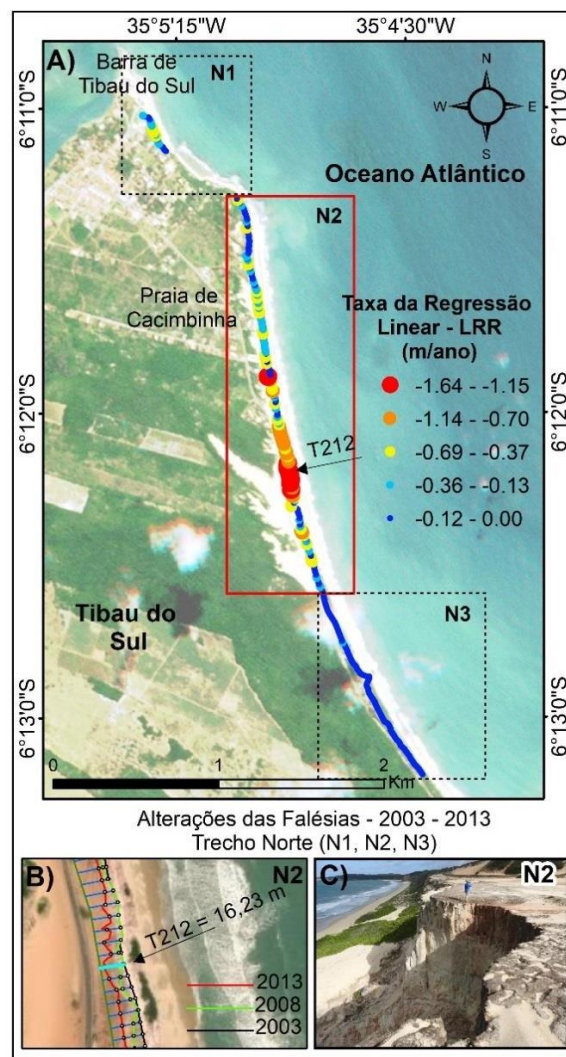


Figura 7 - Modificações da taxa de retração na borda da falésia marinha no Setor Norte: (A) Mapa representativo da taxa de regressão linear (m/ano) entre 2003 a 2013 com a identificação do subsetor mais crítico (N2); (B) Transecto T212 com recuo máximo e proximidade da estrada de acesso; (C) Vista panorâmica do local do transecto T212.

No subsetor C3 ocorreu o maior percentual de 51% de retração em extensão de área de borda de falésia (Figura 8A-C3), com taxa máxima de retração de -2,15 m/ano. No subsetor C1 ocorreu, igualmente, alta taxa de retração entre -0,45 a -1,00 m/ano.

A Figura 8B indica a posição correspondente ao transecto T47 que apresentou o recuo máximo de 21,31 m entre 2003 e 2013. Destaca-se que tanto o subsetor C1 quanto o C3 estão isentos de ocupações e obras de proteção costeira, vegetação relativamente preservada no topo da falésia marinha.

No subsetor C3, a compleição de praia de baixa declividade e a presença de depósitos de tálus no sopé da falésia sugerem que,

mesmo com recobrimento vegetacional, está sujeito a movimentos de massa, o que indica um forte processo erosivo registrado no valor máximo da retração do transecto T47 (Figura 8C). A erosão pluvial é, igualmente, intensa e a encosta da falésia nesse subsetor é íngreme. Braga (2005) e Câmara (2018) indicaram a ocorrência de quedas e tombamentos conspícuos nas escarpas desse setor.

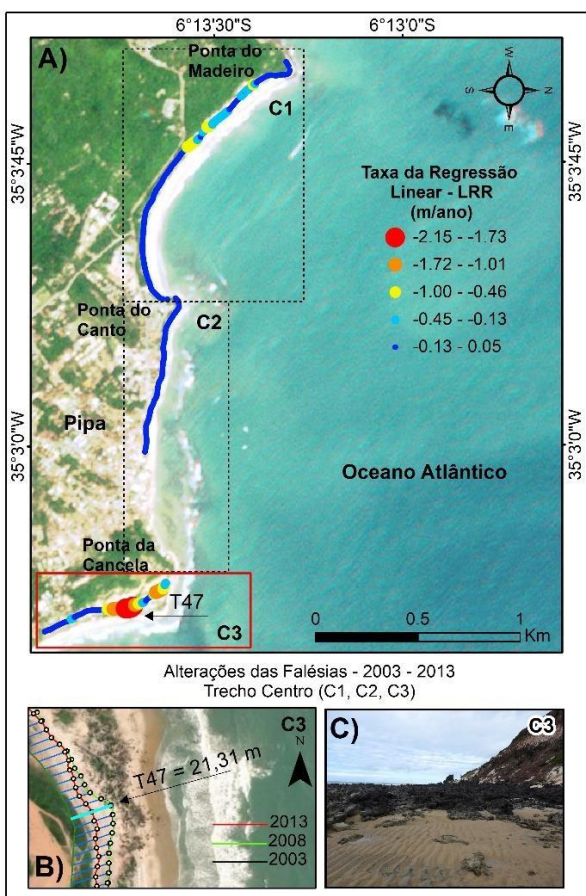


Figura 8 - Modificações da taxa de retração na borda da falésia marinha no Setor Central: (A) Mapa representativo da taxa de regressão linear (m/ano) entre 2003 a 2013 com a identificação do subsetor mais crítico (C3); (B) Transecto T47 com recuo máximo; (C) Vista panorâmica do local do transecto T47.

### 3.3. Setor Sul

O Setor Sul corresponde a 4,41 km de extensão e cerca de 21% esteve submetido a recuo de falésias marinhas, sendo a taxa média de retração correspondente à -0,12 m/ano. Este setor também registrou taxas de retração altas, sobretudo em dois trechos principais, um no subsetor S1 e outro no subsetor S3 (Figura 7).

O subsetor S1 é distinto pela presença de extensa feição morfológica de topo plano e exumado denominado Chapadão de Pipa, com alta incidência de visitação turística por todo o ano. O subsetor S3, nas cercanias da foz do rio Catú, possui concentração

ocupacional e de atividades turísticas. Os resultados mostraram que o subsetor S03 (Figura 9A-S3) foi o mais afetado por recessão de área, com 47% submetido ao processo de retração de falésias, comparados aos 30% do subsetor S1 e ao 23% do subsetor S2.

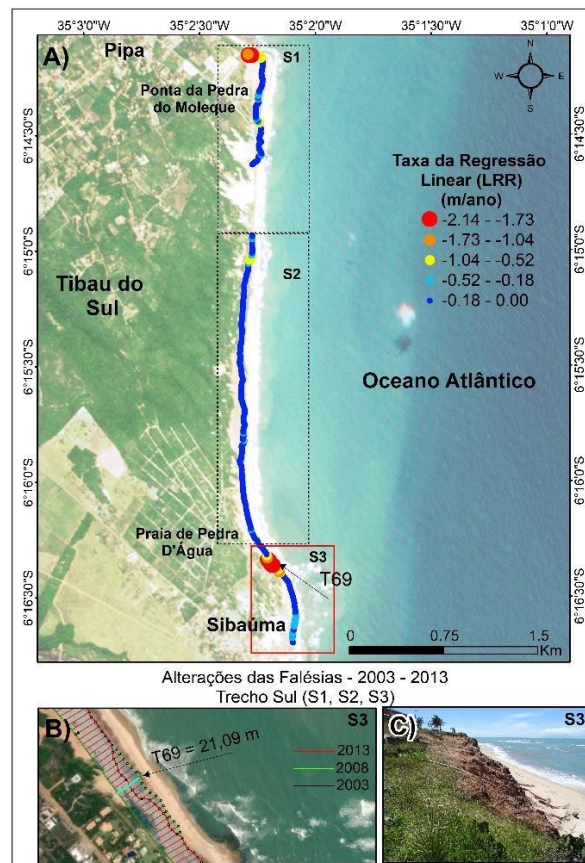


Figura 9 - Modificações da taxa de retração na borda da falésia marinha no Setor Sul: (A) Mapa representativo da taxa de regressão linear (m/ano) entre 2003 a 2013 com a identificação do subsetor mais crítico (S3); (B) Transecto T69 com recuo máximo; (C) Vista panorâmica do local do transecto T69.

No subsetor S3 (Figura 9B), o transecto T69 indicou a maior retração da borda da falésia marinha de 21,09 m na década. As falésias neste setor possuem coloração vermelho-acastanhado escuro, indicando alta cimentação ferruginosa, em relação aos demais trechos de falésias dos demais setores. Este fato pode indicar a maior resistência aos processos erosivos das falésias nesse setor (BRAGA, 2005; CAMARA, 2018). Estes autores ainda relataram a formação de ravinas nos topos das falésias e pontos de afloramento de água subterrânea, como escoamento direcionado a encosta abaixo, como indicativo da erosão pluvial. Outra variável motriz da erosão nesses trechos são as estruturas de drenagens instaladas, desordenadamente, pela comunidade nas bordas das falésias.

Portanto, os trechos com maiores retrações das bordas das falésias em cada setor identificado foram representados pelos transectos T212, T47 e T69, respectivamente indicados nas



figuras 7, 8 e 9. Para cada um desses trechos, o modelo de regressão linear e o valor do  $R^2$  (LR<sup>2</sup>) foi mantido acima de 0,75 (Figura 10), que indicou os valores da tendência erosiva incidida entre os anos de 2003 a 2013, ou o movimento líquido de retração da linha de borda das falésias marinhas. Tais resultados mostram a forte tendência erosiva instalada em todos os setores e sugere que é temporalmente progressiva, evidenciando o processo erosivo em resposta às pressões a que esses locais estão submetidos, seja pela natureza da instabilidade da rocha, maior impacto da erosão pluvial e/ou pela pressão antrópica.

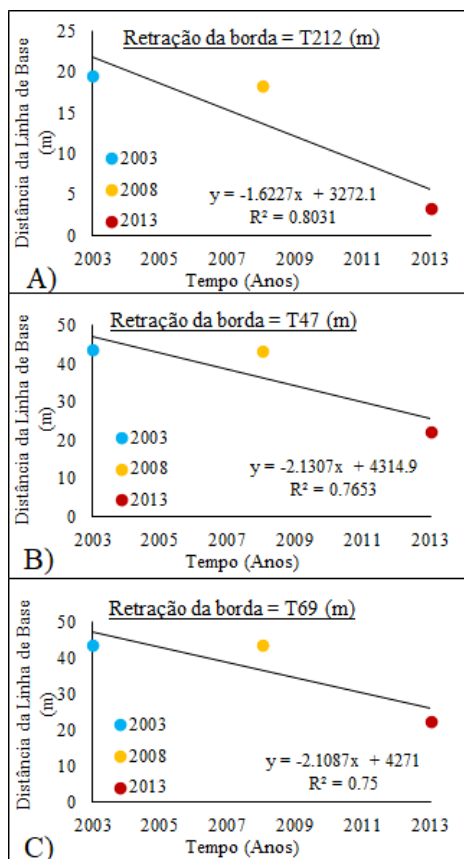


Figura 10 - Modelo de regressão linear com o valor calculado de  $R^2$  (LR<sup>2</sup>) para a retração da linha de borda entre os anos de 2003 a 2013 nos principais transectos erosivos de cada setor: (A) Setor Norte (N02), transecto T212; (B) Setor Central (C3), transecto T47; (C) Setor Sul (S3, transecto T69.

Portanto, demonstra-se que as taxas de erosão, em correlação à de deposição e ao transporte sedimentar, podem variar significativamente de um trecho a outro do litoral, dependentes de vários fatores, entre os quais: regime hidrodinâmico, clima condições de precipitação e características geológicas das falésias marinhas (MOORE e DAVIS, 2015). Contudo, os processos naturais também são sensíveis às interferências antrópicas, como

quando da instalação de estruturas de contenção e defesas costeiras à erosão que, intencionalmente ou inadvertidamente, modificam o regime hidrodinâmico e de transporte de sedimentos local e nas adjacências, sobretudo à jusante do sentido de transporte. Em qualquer setor existem diversas variáveis inter-relacionadas que contribuem para a instabilidade e a erosão das falésias como, por exemplo, as feições de descontinuidades geológicas, a resistência das rochas e do solo constituintes das falésias, a morfologia das falésias, o comportamento das águas subterrâneas, padrões de drenagens e escoamento das águas superficiais, cobertura vegetal e interferências antropogênicas (LEE e CLARK 2002; MOORE e DAVIS, 2015).

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O artigo trouxe uma abordagem baseada na identificação e quantificação dos processos de retração da linha de borda de falésias marinhas, baseada na análise de imagens do satélite QUICKBIRD de alta resolução, em setores litorâneos do Município de Tibau do Sul/RN.

Os resultados corroboram com estudo e investigações geotécnicas anteriores (BRAGA, 2005; SEVERO, 2011; CAMARA, 2018) e as taxas de retrações médias (m/ano) obtidas nos diferentes setores estão de acordo com estudos realizados em outras áreas no mundo e confirmam que a retração de bordas de falésias marinhas, a quantificação do recuo e, assim, a localização de trechos com maiores taxas de recuo podem ser mapeados, com alto desempenho e precisão, pelo uso de Geotecnologias, com base nas imagens de satélite de alta resolução e multitemporais, análises estatísticas em ambiente SIG, além do suporte científico com informações como, por exemplo, mapas geotécnicos, dados geológicos, aerofotografias, entre outros documentos.

Os procedimentos metodológicos desenvolvidos podem ser aplicados em outros setores com falésias marinhas no litoral do RN, onde existem apenas informações quali-quantitativas limitadas, ou em escala regional. Portanto, o mapeamento com imagens de satélite de alta resolução e multitemporais da retração de linha de borda da falésia servem como relevante indicativo de movimentos de massa.

O período de análise desse estudo, uma década entre 2003 e 2013, mostrou que da área total estudada de 11,5 km, 37% das bordas de falésia estiveram submetidas à erosão, o que correspondeu a uma taxa média de retração de -0,44 m/ano. Na análise setorizada, o Setor Central foi o que mostrou com recuos mais altos, com máximos atingindo 23,31 m e taxa de retração de cerca de -2,15 m/ano.

Quanto aos processos envolvidos, corroborando estudos prévios, e no presente identificados em *in loco*, indicam que a magnitude do processo erosivo está relacionada às propriedades de cimentação frágeis das rochas nos estratos superiores e superficiais das falésias marinhas, à intensa erosão pluvial, à constância das forças hidrodinâmicas e às alterações antrópicas inadvertidas, na busca por soluções de proteção às intempéries, diante das condições econômicas instaladas de exploração das belezas cênicas que as falésias marinhas desse litoral representam como atrativo turístico e de moradias.

## 5. REFERÊNCIAS

- AGRAWAL, G.; SARUP, J. Comparison of QUAC and FLAASH Atmospheric Correction Modules on EO-1 Hyperion Data of Sanchi. *International Journal of Advanced Engineering Sciences and Technologies*, Raipur, v. 4, n.1, p. 178-186, 2011.
- ALHEIROS, M. M.; LIMA FILHO, M. F. A Formação Barreiras. Revisão geológica da Faixa Sedimentar Costeira de Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte. *Série Estudos Geológicos*, Recife, v. 10, n. 0, p: 77-88, 1991.
- AL-TAHIR, R.; ALI, A. Assessing land cover changes in the coastal zone using aerial photography. *Surveying and Land Information Science*, Oxford, v. 64, n. 2, p. 107-112, 2004.
- ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, C.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- AMARAL, R. F. *Contribuição ao estudo da evolução morfodinâmica do litoral oriental sul do Rio Grande do Norte, entre a Ponta de Búzios e Baía Formosa*. Tese de doutorado, Programa de Pós Graduação em Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1999. 252p.
- AMARO, V. E.; SANTOS, M. S. T.; SOUTO, M. V. S. *Geotecnologias aplicadas ao monitoramento costeiro: Sensoriamento Remoto e Geodésia de Precisão*. 1 ed. Natal: 2012. 118p.
- BARBOSA, J. A., NEUMANN, V. H, LIMA FILHO, M., SOUZA, E.M., MORAES, M. A. Estratigrafia da faixa costeira Recife-Natal (Bacia da Paraíba e Plataforma de Natal), NE Brasil. *Série Estudos Geológicos*, v. 17, n. 2, p. 1-30, 2007.
- FEITOSA, E.C.; FEITOSA, F.A.C.; LIRA, H.M.P. Relações estratigráficas e estruturais entre a Bacia Potiguar e a Bacia Costeira PE/PB – uma hipótese de trabalho. In: XII CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 12, 2002, Santa Catarina, Anais. Santa Catarina: ABAS, 2002. p. 1-12.
- FERREIRA, J.M.; OLIVEIRA, R.T.; TAKEYA, M.K.; ASSUMPTÇÃO, M. Superposition of local and regional stresses in northeast Brazil: evidence from focal mechanisms around the Potiguar marginal basin. *Geophysical Journal International*, Oxford, v. 134, p. 341–355, 1998.
- LANA, M. C. C.; ROESNER, E. H. Palinologia do Cretáceo Superior marinho subaflorante na região de Natal, RN. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, Rio de Janeiro, v. 7, n. 1, p. 149-50, 1999.
- BARRETO, A. M. F.; SUGUIO, K.; BEZERRA, F. H. R.; TATUMI, S. H.; YEE, M.; GIANNINI, P. C. F. Geologia e geomorfologia do quaternário costeiro do estado do Rio Grande do Norte. *Geologia USP Série Científica*. São Paulo, v. 4, n. 2, p. 1-12, 2004.
- BEZERRA, F. H. R.; AMARO, V. E.; VITAFINZI, C.; SAADI, A. Pliocene-Quaternary fault control of sedimentation and coastal plain morphology in NE Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*. v. 14, p. 61-75, 2001.
- BATISTA, E. M.; SOUZA FILHO, P. W.; SILVEIRA, O. F. M. Avaliação de áreas deposicionais e erosivas em cabos lamosos da zona costeira amazônica através da análise multitemporal de imagens de sensores remotos. *Revista Brasileira de Geofísica*, São Paulo, v. 27, n. 1, p. 83-96, 2009.
- BIRD, E.C.F. *Coastal geomorphology: an introduction*. 2 ed. Melbourne: John Wiley & Sons, 2008. 436p.
- BOAK, E.H.; TURNER, I.L. Shoreline definition and detection: a review. *Journal of Coastal Research*, Florida, v. 21, n. 4, p. 688-703, 2005
- BRAGA, K. G. *Uso de Checklist para Identificação da Erosão Costeira em Tibau do Sul/RN. Natal, 2005*. Dissertação de mestrado apresentado ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2005. 96p.
- BRANNER, J. C. The stone reefs of Brazil, their geological and geographical relations. *Bulletin of the Museum of Comparative Zoology*, Massachusetts, v. 44, n. 7. P. 1-196, 1904.
- BUSMAN, D. V.; AMARO, V. E.; PRUDÊNCIO, M. C. Comparison of prognostic models in different scenarios of shoreline position on Ponta Negra beach in Northeast Brazil. *International Journal of Environmental and Ecological Engineering*, New Castle, v. 8, n. 3, p. 170-174, 2014.
- CAI, F.; SU, X.; LIU, J.; LI, B.; LEI, G. Coastal erosion in China under the condition of global climate change and measures for its prevention. *Progress in Natural Science*, Amsterdam, v. 19, n. 4, p. 2009.
- CALLIARI, L.R.; MUEHE, D.; HOEFEL, F.G.; TOLDO JR., E. Morfodinâmica praial: uma breve revisão. *Revista Brasileira de Oceanografia*, São Paulo, v. 51, p. 63-78. 2003.
- CAMARA, M.R. *Análise de recuo de falésias no litoral do Estado do Rio Grande do Norte*. Dissertação de mestrado apresentado ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2018. 148p.

- CAMARA, M.; SCUDELARI, A.; AMARO, V.; MATOS, M.; RABELO, T. Geotecnologias como Subsídio para Gestão de Ambientes Costeiros: Análise do Recuo em Falésias/Arribas no Estado do Rio Grande do Norte, Brasil, e Suas Implicações Socioambientais. *Revista de Geografia e Ordenamento do Território*, Porto, v. 16, n. 4, p. 53-79, 2019.
- CHAVEZ JR., P.S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sensing of Environment*, Amsterdã, v. 24, p. 459-479, 1988.
- CHAVEZ JR, P.S. Image-based atmospheric correction - revisited and improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Maryland, v. 62, n. 9, p.1025-1036, 1996.
- DAHDOUH-GUEDES, F.; VERHEYDEN, A., KAIRO, J.G., JAYATISSA, L.P. AND KOEDAM, N. Capacity building in tropical coastal recourse monitoring in developing countries: A re-appreciation of the oldest remote sensing method. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, Oxford, v. 13, n. 1, p. 62-76, 2006.
- DAVIDSON-ARNOTT, R. *Introduction to coastal processes and geomorphology*. 1 ed. Cambridge: Cambridge University, 2010. 410p.
- EMERY, K.O.; KUHN, G.G. Sea cliffs: their processes, profiles, and classifications. *Geological Society of American Bulletin*, Colorado, v. 93, n. 7, p. 644-654, 1982.
- EARLIE, C.; MASSELINK, G.; RUSSEL, P. The role of beach morphology on coastal cliff erosion under extreme waves. *Earth Surface Processes and Landforms*, London, v. 43, n. 6, p. 1213-1228, 2017.
- FALL, M. A GIS-based mapping of historical coastal cliff recession. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Germany, v. 68, p. 473-482, 2009
- FLETCHER, C. H.; MULLANE, R. A.; RICHMOND, B. M. Beach loss along armored shorelines on Oahu, Hawaiian Islands. *Journal of Coastal Research*, Florida, v. 13, n. 1, p. 209-215, 1997.
- GRIGGS, G.B.; PATSCH, K.B. Cliff erosion and bluff retreat along the California coast. *Sea Technology*, Arlington, v.45, n. 9, p. 36-40, 2004.
- GOBBI, E. S.; LADEIRA, F. S. B. Proposta para Mapeamento de Riscos Associados à Movimento de Massa e Inundação: o caso de Ubatuba, SP. *Geociências*, São Paulo, v. 30, n. 3, p. 445-456, 2011.
- HIMMELSTOSS, E.A.; HENRERSON, R.E.; KRATZMANN, M.G.; FARRIS, A.S. Digital shoreline analysis system (DSAS) version 5.0 user guide. *U.S. Geological Survey Open-File Report 2018-1179*. Virginia, 2018.
- KIRK, R.M. Coastal changes at Kaikoura, 1942- 1974, determined from air photographs. *N.Z. Journal of Geology and Geophysics*, New Zealand, v. 18, p. 787-801, 1975.
- LADEIRA, F.S.B.; SANTOS, M. O uso de paleossolos e perfis de alteração para a identificação e análise de superfícies geomórficas regionais: o caso da Serra de Itaqueri (SP). *Revista Brasileira de Geomorfologia*, Brasília, v. 6, n. 2, p. 2005.
- LEE, E.M.; CLARK, A.R. *Investigation and management of soft rock cliffs*. 1 ed. London: Thomas Telford: 2002.
- LOPEZ- SAEZ, J.; CORONA, C.; MOREL, P.; ROVÉRA, G.; DEWEZ, T. J. B.; STOFFEL, M.; BERGER, F. Quantification of cliff retreat in coastal Quaternary sediments using anatomical changes in exposed tree roots. *Earth Surface Processes and Landforms*, London, v. 43, n. 15, p. 2983-2997, 2018.
- MABESOONE, J. M.; ALHEIROS, M. M. Origem da bacia sedimentar costeira Pernambuco-Paraíba. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 18, n. 4, p. 476-482, 1988.
- MABESOONE, J. M.; ALHEIROS, M. M. Evolution of the Pernambuco-Paraíba Rio Grande do Norte Basin and the problem of the South Atlantic connection. *Geologie en Mijnbouw*, Switzerland, v. 71, p. 351-362, 1993.
- MASSELINK, G.; HUGHES, M.G.; KNIGHT, J. *Introduction to coastal processes and geomorphology*. 2 ed. New York: Taylor & Francis Group, 2003. 419p.
- MCGRANAHAN, G.; BALK, D.; ANDERSON, B. The rising tide: assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones. *Environment & Urbanization*, Thousand Oaks, v. 19, n. 1, p. 17-37. 2007.
- MENTASCHI, L.; VOUSDOKAS, M. I.; PEKEL, J. F.; VOUKOUVALAS, E.; FEYEN, L. Global long-term observations of coastal erosion and accretion. *Scientific Reports*. Bethesda, v. 8, n. 1, p. 1-11, 2018.
- MOORE, R.; ROGERS, J.; WOODGET, A. Climate change impact on cliff instability and erosion. *Floods and Water Management Act*. p. 1-12. 2010.
- MOORE, R.; DAVIS, G. Cliff instability and erosion management in England and Wales. *Journal of Coastal Conservation*, Netherlands, v. 19, p. 771-784, 2015.
- NOGUEIRA, A. M. B.; LIMA, M. S.; SALIM, J.; SÁ, J. M.; MANSO, V. A.V. Estudo das areias de dunas da faixa litorânea de Natal – Rio Grande do Norte. In: *Simpósio de Geologia do Nordeste*. Fortaleza: SBG-Núcleo Nordeste, 1975. p. 39.
- NOGUEIRA, A. M. B.; COSTA NETO, L. X.; LIMA, M. S.; SILVEIRA, M. I. M.; FERNANDES, C. A. N. Evolução geo-ambiental da faixa costeira entre Ponta do Calcanhar e Ponta do Marcos-RN. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE

- GEOLOGIA, 1990, Natal, *Anais*, Natal: CBG, 1990. p. 784-795.
- NICHOLLS, R.J. Coastal flooding and wetland loss in the 21st century: changes under the SRES climate and socioeconomic scenarios. *Global Environmental Change*, Amsterdã, v. 14, n. 1, p. 69–86, 2004.
- PIERRI, G. C. S. *Análise de risco a erosão costeira na região de Tibau do Sul/RN, através de mapeamento geoambiental e análises morfodissemica*. Dissertação de mestrado apresentado ao Programa de Pós Graduação em Geodinâmica e Geofísica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2008. 140p.
- PRUDÊNCIO, M.C.; AMARO, V.E.; SCUDELARI, A.C. Análise da Evolução Costeira entre os Anos de 1984 e 2014 de Trecho do Litoral Oriental do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências*, Rio de Janeiro, v. 42, n. 4, p. 189-205, 2019.
- SAROGLOU C.; ALEXANDROU D. Coastal cliff instability, a case study from the UK. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, v. 50, n. 2, p. 949-958, 2016.
- SANTOS JÚNIOR, O.F.; SCUDELARI, A.C.; COSTA, Y.D.; COSTA, C.M. Sea Cliff retreat mechanisms in Northeastern Brazil. *Journal of Coastal Research*, Florida, v. 64. n. SI, p. 820-824, 2011.
- SCUDELARI, A. C.; FREIRE, L. C. S. Determinação dos Impactos Ambientais na Construção de um Sistema Hoteleiro nas Falésias em Tibau Do Sul-RN. *Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology*, Camburiú, v. 9, n. 1, p. 39-43, 2005.
- SEVERO, R.N.F. *Análise da estabilidade das falésias entre Tibau do Sul e Pipa – RN*. Dissertação de mestrado apresentado ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2005. 139p.
- SEVERO, R.N.F. *Caracterização geotécnica da falésia da Ponta do Pirambu em Tibau do Sul – RN considerando a influência do comportamento dos solos nos estados indeformados e cimentado artificialmente*. Tese de doutorado apresentado ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, 2011. 280p.
- SMALL, C.; NICHOLLS, R. J. A global analysis of human settlement in coastal zones. *Journal of Coastal Research*, Florida, v. 19, n. 3, p. 584-599, 2003.
- SILVEIRA, J. D. *Morfologia do litoral*. In: AZEVEDO, A. 1 ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 1964. 336p.
- SUGUIO, K.; MARTIN, L.; BITTENCOURT, A. C. S. P.; DOMINGUEZ, J. M. L.; FLEXOR, J. M.; AZEVEDO, A. E. G. Flutuações do nível relativo do mar durante o Quaternário superior ao longo do litoral brasileiro e suas implicações na sedimentação costeira. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 15, n. 4, p. 273-286, 1985.
- SOUZA JÚNIOR, C.S. *Análise da Estabilidade de Falésias/arribas na Zona Costeira de Baía Formosa/RN*. Dissertação de mestrado apresentado ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2013. 141p.
- SUNAMURA, T. *Geomorphology of rocky coasts*. 1 ed. New York, John Wiley and Sons, 1992. 302p.
- TAQUEZ, D.E.D. *Susceptibilidade à ocorrência de movimentos de massa e avaliação da estabilidade de falésias sob condição não saturada: estudo de caso no centro de lançamentos da barreira do inferno – Brasil*. Dissertação de mestrado apresentado ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2017. 216p.
- THIELER, E. R.; HIMMELSTOSS, E. A.; ZICHICHI, J. L.; ERGUL, A. “DSAS 4.0 Instruções de Instalação e Guia do Usuário”, em Digital Shoreline Analysis System (DSAS) versão 4.0 - uma extensão do ArcGIS para Calculando a mudança da linha costeira. *U.S. Geological Survey Open-File Report*. 2008-1278. 2009
- TRENHAILE, A.S. *The geomorphology of rocky coasts*. 1 ed. Oxford: Clarendon Press, 1987. 384p.
- TRENHAILE, A.S. Rocky coasts – their role as depositional environments. *Earth Science Reviews*, Amisterdam, v. 159, p. 1-13, 2016.
- VIEIRA M.M.; DE ROS L.F. Cementation patterns and genetic implications of Holocene beachrocks from northeastern Brazil. *Sedimentary Geology*, Amsterdam, v. 192, n. 3, p. 207-230, 2006.
- VITAL, H.; SILVEIRA, I.M.; LIMA, Z.M.C.; TABOSA, W.F.; SILVA, A.G.A.; SOUZA, F.E.S.; CHAVES, M.S.; GOMES, M.P. *Rio Grande do Norte*. In: MUEHE, D. 2 ed. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2018. 761p.
- WILLIAMS, A.; RANGEL-BUITRAGO, N. G.; PRANZINI, E.; ANFUSO, G.09 The management of coastal erosion. *Ocean & Coastal Management*, Amsterdam, v. 156, p. 114-129, 2017.
- WRIGHT, L. D.; SHORT, A. D. 1983. *Morphodynamics of beaches and surf zones in Australia*. In: Komar P. D. ed. Handbook of coastal processes and erosion. Boca Raton, CRC Press, p. 35-64.
- YOUNG, A. Decadal-scale coastal cliff retreat in southern and central California. *Geomorphology*, Amisterdam, v. 300, p. 164-175, 2018.

---

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, ao Laboratório de Geotecnologias Aplicadas, Modelagens Costeira e Oceânica da UFRN e ao Programa

Nacional de Pós-Doutorado (PNPD/CAPES) por meio do Projeto “*Monitoramento de Praias Arenosas do Litoral do Rio Grande do Norte por Meio de Geotecnologias de Precisão e Modelagem Numérica do Ambiente Costeiro*”.

---

Recebido em: 09/06/2020

Aceito para publicação em: 05/08/2021