

Artigo de Pesquisa

Estimativa do volume erodido e da taxa de retração em curto prazo na falésia marinha ativa da Barreira do Inferno com o uso de Laser Scanner Terrestre

Estimation of eroded volume and retraction rate in short-term on the Barreira do Inferno active seaciff using Terrestrial Laser Scanner

Venerando Eustáquio Amaro ¹, José Edson de Almeida Júnior ², Ada Cristina Scudelari ³, Maria de Fátima Alves de Matos ⁴ e William Vieira Gomes ⁵

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Engenharia Civil, Natal, Brasil. E-mail: venerando.amaro@gmail.com

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

² Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Natal, Brasil. E-mail: joseedsonalmeida@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0342-5798>

³ Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Engenharia Civil, Natal, Brasil. E-mail: adaufn@gmail.com

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

⁴ Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Natal, Brasil. E-mail: mfatimaalves.m@gmail.com

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

⁵ Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Natal, Brasil. E-mail: william.vieira@ufersa.edu.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0838-7807>

Recebido: 28/04/2020; Aceito: 20/06/2020; Publicado: 01/07/2021

Resumo: Este artigo intenciona estimar o volume erodido e a retração de curto prazo temporal (período de seis meses) na falésia marinha ativa da Barreira do Inferno localizada no Litoral Oriental do Estado do Rio Grande do Norte, com base no uso de Laser Escâner Terrestre (LT) e no georreferenciamento de nuvem pontos com *Global Navigation Satellite Systems* (GNSS). As varreduras do talude da falésia foram conduzidas em duas ocasiões, a primeira em 21/08/2016 (inverno austral) e a seguinte em 24/02/2017 (verão austral). As nuvens de pontos obtidas nesses levantamentos foram processadas nos *softwares* *CloudCompare*, *ArcMap*, *Surfer* e *Global Mapper*, para a seleção de Modelos Digitais de Terreno (MDT) que melhor representassem as feições descritas na face da falésia em erosão, por meio dos métodos interpoladores espaciais: IDW, NN, *Kriging* e TIN. Nesta abordagem, a falésia marinha foi subdividida em cinco setores, de comportamentos erosivos distintos, para a avaliação do desempenho do MDT, da quantificação do volume erodido total e da taxa de retração, a partir da comparação entre os MDT e os perfis transversais gerados com as nuvens de pontos do LT. O método interpolador TIN dos *softwares* *CloudCompare* e *ArcMap* foi o mais adequado para representação detalhada das irregularidades na superfície e das incisões basais no talude. A estratégia metodológica destacou ainda a relevância da avaliação da confiabilidade da nuvem de pontos quanto à presença de vazios de pontos no MDT, devido aos sombreamentos nas varreduras com LT, e são fontes de erros significativos no cálculo final volume erodido total e da taxa de retração. Os resultados indicaram que a falésia ativa

apresentou volume erodido de 333 m³ no curto prazo e retração geral de 6±3,1cm nesse período, ou 12±6,2 cm/ano. Finalmente, este estudo confirma a aptidão do uso do LT acoplado a GNSS, com alta precisão e acurácia, na obtenção de resultados detalhados sobre os efeitos da erosão sobre falésias ativas submetidas à intensa dinâmica costeira do Nordeste brasileiro.

Palavras-chave: Erosão Costeira; Hidrodinâmica; Formação Barreiras

Abstract: This article intends to estimate the eroded volume and retraction in short term (six month period) on the Barreira do Inferno active seacliff located on the Eastern Coast of the State of Rio Grande do Norte, based on the use of Terrestrial Laser Scanner (TLS) and point clouds georeferencing with Global Navigation Satellite Systems (GNSS). The seacliff slope scanning was conducted in two occasions, the first on 08/21/2016 (austral winter) and the following on 02/24/2017 (austral summer). The point clouds obtained in these surveys were processed in the softwares *CloudCompare*, *ArcMap*, *Surfer* and *Global Mapper* for the selection of Digital Terrain Models (DTM) that better represent the features described on the seacliff slope in erosion according to spatial interpolation methods: IDW, NN, *Kriging* and TIN. In this approach, the seacliff was subdivided into five sectors, of distinct erosive behaviours, for the assessment of DTM performance, quantification of total eroded volume and retraction rate from the comparison between DTM and cross-profiles generated with TLS point clouds. The TIN interpolator method of the *CloudCompare* and *ArcMap* softwares was the most suitable for detailed representation of irregularities in the surface and basal incisions in the slope. The methodological strategy also highlighted the relevance of assessing the reliability of the point cloud for the presence of point voids in DTM, due to shadows on TLS scans, and as sources of significant errors in the final calculation of total eroded volume and retraction rate. The results indicated that the active seacliff had an eroded volume of 333 m³ in the short term and a general retraction of 6±3.1cm in this period, or 12±6.2 cm/year. Finally, this study confirms the suitability of using TLS coupled to GNSS, with high precision and accuracy, in obtaining detailed results on the effects of erosion on active seacliffs subjected to the intense coastal dynamics of Northeast Brazil.

Keywords: Coastal Erosion; Hydrodynamics; Barreiras Formation

1. Introdução

Atualmente, cerca de 50% da população mundial vive no domínio de até 100 km da linha de costa (CROSSLAND et al., 2005; BIRD, 2008), considerado pelo *Millennium Ecosystem Assessment* como o limiar demarcatório continental para as zonas costeiras (UNEP, 2006; CBD, 2012). Trata-se de estreitas faixas terrestres em interfaces dominadas pela influência das condicionantes climatológicas, das forças motrizes meteoceanográficas locais (ventos, clima de ondas, marés e correntes) e dos aerossóis marinhos sobre as propriedades físico-químicas e biológicas dos substratos terrestres emersos.

Ainda que compondo menos de 20% da superfície terrestre, as zonas costeiras em todos os continentes têm sido, no decorrer da história da humanidade, os recortes geográficos mais favoráveis à ocupação antrópica, decorrência direto dos serviços ambientais que a zona costeira proporciona, aliando as produtividades primária e secundária às facilidades de transporte e comunicação e disponibilidade de água doce (UNEP, 2006; CBD, 2012; RAMESH et al., 2015). Adicionalmente, 71% da população costeira atual vivem no contorno de até 50km de estuários, incluindo 21 das 33 megacidades do mundo e diversos aglomerados urbanos (UNEP, 2006; VON GLASOW et al., 2013). Ainda, devido à relevante atratividade paisagística, uma série de atividades socioeconômicas é desenvolvida dos setores de topos e sopés de falésias marinhas, por proporcionarem amplo valor estético às belezas cênicas naturais (MARQUES, 2009; DEWEZ et al., 2013).

Assim, à medida que crescem as atividades antropogênicas na zona costeira, se intensificam as pressões socioeconômicas e se asseveram os impactos negativos sobre os ecossistemas costeiros e os riscos sobre as populações (CROSSLAND et al., 2005; RAMESH et al., 2015). Isto ocorre, sobretudo, devido ao conjunto de fatores

inter-relacionados, tais como: a ausência de dados físicos sobre as feições costeiras e forçantes hidrodinâmicas; aos malogrados projetos de intervenções com obras de engenharia e, igualmente, aos planejamentos de políticas públicas que amparam tais ingerências (NEAL et al., 2018). Contudo, perduram demandas crescentes pelo desenvolvimento urbano costeiro e pelo uso dos recursos costeiros, acompanhando o crescimento continuado da população costeira, como é o caso das infraestruturas energética *offshore* (ASIF; MUNEER, 2007). Estes fatos constituem e as questões desafiadoras para os formuladores de políticas públicas, responsáveis pela gestão ambiental e sustentabilidade das zonas costeiras (FRASER et al., 2006).

Emery e Kuhn (1982) inferiram que a distribuição global de falésias marinhas (e costões rochosos) alcance 80% das linhas de costa, apesar do número reduzido de pesquisas que comprovem esta estatística (NAYLOR et al., 2010). Recentemente, Young e Carille (2019) sugeriram que as falésias marinhas ocorrem em 52% do litoral global, baseados em pesquisa detalhada na literatura prévia, em imagens de satélite e na avaliação banco de dados globais de mapeamentos baseados em SIG, com intervalos de 1km. Estes autores indicaram ainda que as falésias em retração foram identificadas em pelo menos uma localidade costeira em 33% dos países independentes e em 15% das regiões não independentes. Contudo, a dificuldade na identificação dessa distribuição deve-se às questões como as subjetividades nos esquemas de classificações topológicas e composicionais das linhas de costa, que muitas vezes categorizam as linhas de costas rochosas em “macias”, geralmente de menor relevo, ou “duras”, diante dos agentes erosivos dominantes (YOUNG; CARILLI, 2019).

As falésias marinhas possuem ampla variação morfogênica devido à interdependência, localmente, de seus atributos e demais fatores litorâneos, entre os quais: a composição e o arranjo dos estratos litológicos; o arcabouço estrutural (falhas, fraturas e juntas) predominantes nos taludes; as condicionantes intempéricas, aliadas à exposição dos taludes ao intemperismo; e, a energia sazonal dos fatores meteorológicos e das forçantes hidrodinâmicas (DOODY; ROONEY, 2015). Tal combinação multifatorial responsável pelo intemperismo físico e químico de falésias marinhas foi agregada no termo *corrosão marinha* (PIRAZZOLI, 1986). Portanto, as retrações nos taludes e topos as falésias marinhas ativas são resultado preferencial das ações persistentes dos agentes oceânicos, porém atrelados aos agentes exógenos da erosão continental e aos tipos de atividades antropogênicas de uso da terra no entorno, todos esses fatores dinâmicos sincronicamente responsáveis pelo desgaste, escoamento e sedimentação dos materiais (SUGUIO, 1998).

Neste trabalho, adota-se o termo falésias marinhas como feições da paisagem de topologia íngreme e abrupta, formando escarpas rochosas com inclinação superior a 40º, comumente, verticalizadas, de alturas variáveis e não recobertas por vegetação, resultantes das ações abrasivas do regime de ondas e do intemperismo físico-químico-biológico sobre estratos litológicos (CHRISTOFOLETTI, 1980; SUGUIO, 2008). Ainda, conforme Suguio (1998), quando a falésia enfrenta os ininterruptos esforços erosivos das forçantes oceânicas trata-se de falésia marinha ativa (viva), mas quando essa atuação cessa tem-se a falésia marinha inativa (morta). Nas bases das falésias marinhas ativas, o impacto contínuo das forçantes hidrodinâmicas provoca a destruição mecânica das bases dos taludes produzindo incisão basal que, frequentemente, acarretam escorregamentos, desmoronamentos e quedas de blocos (SUERTEGARAY, 2003).

Os intensos processos hidrodinâmicos atuantes no Litoral Oriental do Estado do Rio Grande do Norte (RN) estão refletidos nas relevantes taxas de retração identificadas para a linha de costa, notadamente dominada por falésias ativas e praias arenosas, que promovem alterações espaço-temporais relevantes nos modos de ocupação da orla marítima, justificando o reconhecimento pormenorizado dos processos erosivos envolvidos e as

propriedades do meio físico impactado (SANTOS JR. et al., 2011; AMARO et al., 2013; CÂMARA et al., 2019; MATOS et al., 2020). As falésias marinhas ativas da Formação Barreiras correspondem a 65km dos 166km de extensão do Litoral Oriental do RN (VITAL et al., 2006; VITAL; AMARO; SILVEIRA, 2006), intercaladas com praias arenosas e estuários, que concentra cerca de 50% da população do Estado em 23 municípios. Os processos erosivos atuantes impactam custosamente setores de importância socioeconômica estabelecidos nessa zona costeira, como as indústrias (por exemplo, carcinicultura e salicultura), o turismo, a infraestrutura privada e público como, por exemplo, a destruição de patrimônio ocorrida na área urbana da praia de Ponta Negra em Natal (AMARO et al., 2013; AMARO et al., 2014).

A área de interesse deste artigo, o trecho denominado falésia da Barreira do Inferno, está locado no Litoral Oriental do RN imediatamente a sul da praia de Ponta Negra e os estratos litológicos correspondem às fácies da Formação Barreiras, expostos em afloramentos com cerca de 2,5km de extensão e altura alcançando 20m (ARAÚJO et al., 2006). Trata-se de trecho do litoral com baixa ocupação antropogênica, por ser área militarmente protegida, vizinha à principal área urbana do Estado, a cidade de Natal. Assim, quantificar as modificações físicas e compreender a atuação dos fatores naturais envolvidos na retração dessa falésia marinha ativa é motivação suficiente a esse estudo sobre a erosão costeira, visto que os processos erosivos, responsáveis pela remoção, transporte e sedimentação de material podem diferir de um local para outro, mas são fatores contínuos e sistêmicos que resultam em considerável variabilidade espaço-temporal, que englobam áreas adjacentes (SHIH; KOLMAR, 1994).

Portanto, o objetivo deste artigo é quantificar a retração no curto prazo temporal entre o inverno do ano de 2016 e o verão de 2017, perfazendo cerca de seis meses, impressa na falésia da Barreira do Inferno empregando a varredura com Laser Escâner Terrestre (doravante apenas LT) acoplado ao levantamento geodésico com *Global Navigation Satellite Systems* (GNSS) para o georreferenciamento da nuvem de pontos. Desdobram-se como objetivos específicos: a seleção do método de interpolação mais adequado à representação das feições observadas no talude; a correlação da retração ao principal agente indutor erosivo, por meio de perfis transversais à face da falésia; e, a quantificação da taxa de retração e volume de erosão total para o período, por meio da comparação entre os Modelos Digitais de Terreno (MDT) obtidos em cada levantamento em campo.

O LT, também aludido como LiDAR (acrônimo de *Light Detection And Ranging*) terrestre ou LiDAR topográfico, obtém as coordenadas XYZ de numerosos pontos numa superfície (alvo), compondo uma nuvem de pontos, pela emissão de pulsos a laser em direção a tais pontos e medindo a distância entre o dispositivo emissor e o alvo (VOSSSELMAN e MAAS, 2010). O emprego de Geotecnologias como o LT integrado ao georreferenciamento com GNSS tem sido largamente utilizado na mensuração tridimensional detalhada das modificações físicas em zonas costeiras ao redor do mundo (HOBBS et al., 2010) onde as forças motrizes climáticas e oceânicas operam de modo contínuo e interativo, promovendo movimentos de massas (ROWLANDS; JONES; WHITWORTH, 2003; JABOYEDOFF et al., 2012; AMARO; SANTOS; SOUTO, 2012; MICHOUUD et al., 2014) e erosão da linha de costa (HOBBS et al., 2002; POULTON et al., 2006). A vantagem na utilização dessa metodologia reside nas dificuldades de acesso aos taludes e topos de falésias ativas com equipamentos convencionais para o mapeamento de modificações, incluindo o fator segurança dos envolvidos, do alto desempenho da operação diante do custo financeiro, da rapidez, da praticidade e da qualidade de resultados obtidos (GUTIERREZ et al., 2001; OLSEN et al., 2008; HOBBS et al., 2010; SANTOS et al., 2015; SANTOS; AMARO; SANTOS, 2014).

Por se tratar de estudo pioneiro na região, pretende-se que as discussões expostas sirvam como subsídio aos trabalhos futuros na mesma temática, neste local ou em outros setores costeiros similares, para coleta e processamento de dados sobre a erosão costeira em intervalos temporais diversos, do curto ao longo prazo (ARCILLA; MARCEL; KRAUS, 1994; O'DEA; BRODLE; HARTZELL, 2019).

2. Caracterização da Área de Estudo

A falésia marinha ativa da Barreira do Inferno está inserida no contexto geográfico do Centro de Lançamento Barreira do Inferno (CLBI), instalado 12km ao sul da cidade de Natal/RN no Município de Parnamirim, criado no dia 12/10/1965 pela Força Aérea Brasileira como a primeira base aérea de foguetes da América do Sul. No presente, opera na execução de lançamentos e prestação de suporte às atividades de sondagem e rastreamento de engenhos aeroespaciais (CLBI, 2017). O CLBI ocupa aproximadamente 1.800ha de área militarmente protegida na zona costeira e, portanto, de relevância como área de pesquisa, conservação e manejo ambiental, com cerca de 9km de extensão de linha de costa, marcada por falésia marinha ativa e pelo sistema de composto por praias arenosas, campos de dunas móveis e fixadas por vegetação. Os levantamentos consideraram um trecho com cerca de 650m de extensão para a varredura com LT como representativo da falésia marinha ativa da Barreira do Inferno e que, parcialmente, possui praia arenosa defrontante (Figura 1).

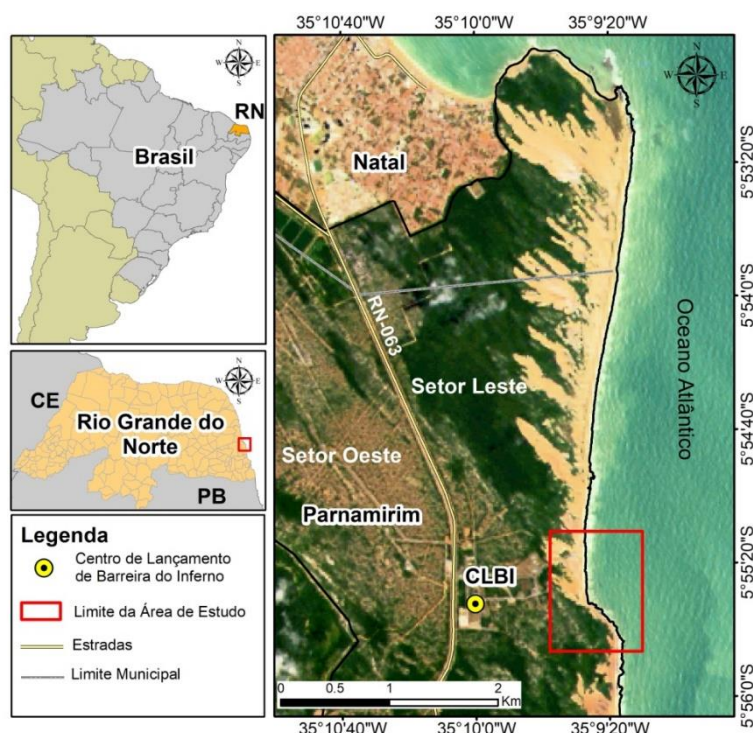


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo, a falésia marinha da Barreira do Inferno, no domínio do Centro de Lançamento Barreira do Inferno (CLBI), município de Parnamirim, litoral oriental do Rio Grande do Norte (RN), nordeste do Brasil.

2.1. Aspectos Geológicos e Geomorfológicos

O Litoral Oriental do RN é distinto pela sequência de falésias ativas e baías em forma parabólica, ou em *anzol*, como característica geomorfológica marcante da linha de costa, sendo esta sequência constituída pela erosão marinha pertinente aos padrões de refração e difração de ondas e do fluxo de correntes de deriva litorânea resultantes. Agrega-se ao processo erosivo a atuação de mesomares semidiurnas na erosão diferencial sobre a sequência de rochas sedimentares das formações Barreiras e Potengi. Contíguas às falésias marinhas sucede o

sistema composto por praias arenosas e campos de depósitos eólicos de areias finas a médias (dunas móveis), por vezes fixados por vegetação (dunas fixas), e as planícies estuarinas, restritas às desembocaduras dos principais rios (BARRETO et al., 2004; VITAL et al., 2006). Outra feição geológico-geomorfológica distinta no Litoral Oriental é a ocorrência de arenitos praias (*beachrocks*) alinhados paralelamente à costa atual, que se comportam como barreiras naturais às forças motrizes hidrodinâmicas, alterando o padrão de arrebentação das ondas e acentuando a erosão costeira nas áreas de interrupção de suas ocorrências (VITAL et al., 2006).

A Formação Barreiras se estende na zona costeira brasileira desde os estados do Rio de Janeiro até o Amapá, assinalada pela ocorrência quase contínua de suas unidades litológicas e pela regularidade geomorfológica, em Tabuleiros Costeiros delimitados por falésias marinhas ativas e inativas (ARAÍ, 2006; FURLAN, 2014). É composta por estratos sedimentares terciários moldados no Pleistoceno e no Holoceno, mesmo com controvérsias sobre o arranjo litoestratigráfico (MOURA-FÉ, 2014) e, na área de estudo, estão recobertos por arenitos da Formação Potengi, descontinuamente, e por depósitos litorâneos arenosos de praias, dunas e depósitos aluvionares do Quaternário (Figura 2).

No aspecto faciológico das rochas na falésia marinha da Barreira do Inferno, foram identificadas três litofácies desde a porção basal, na altura da incidência das ondas atuais, até o topo da falésia, onde estão sobrepostos em discordância erosiva pelos arenitos ferruginosos médios a grossos da Formação Potengi (ARAÚJO et al., 2006): (i) fácies de conglomerados, sustentados por matriz arenosa, com estratificação cruzada acanalada de grande e médio porte e, subordinadamente, conglomerados com seixos de quartzo, feldspatos e clastos de argila; (ii) fácies de arenitos amarelados com textura muito grossa, grossa e média, com estratificação cruzada acanalada, e subordinadamente tabular, com seixos ou grânulos de quartzo dispersos; e, (iii) fácies de lamitos avermelhados, com intercalações de arenito fino e muito fino. O sistema deposicional predominante é definido como de depósitos de preenchimento de canal aluvionar (primeira e segunda fácies) conexos a depósitos de planície de inundação (terceira fácies), em conformidade com sistemas fluviais meandantes no modelo proposto por Walker (1976).

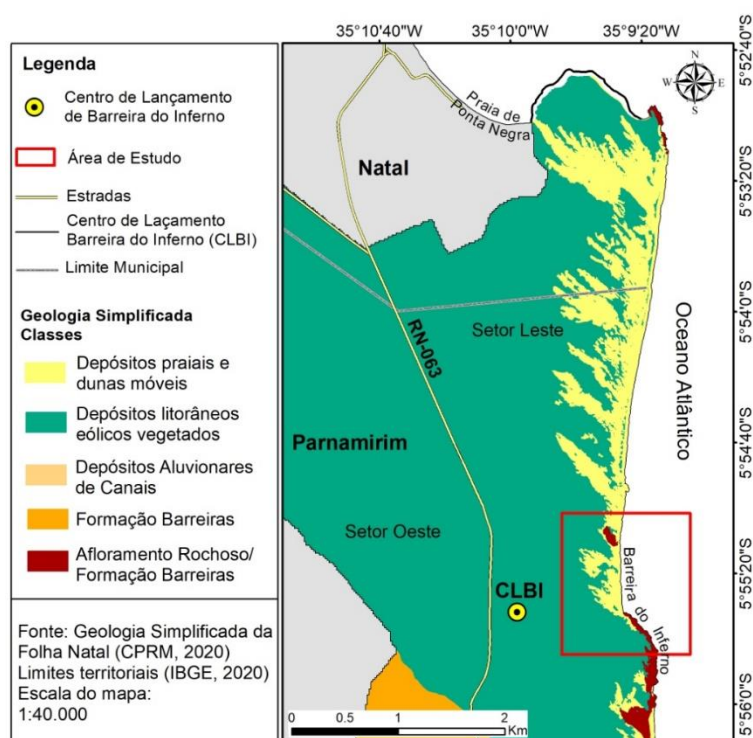


Figura 2. Esboço das unidades geológicas presentes no contexto do Centro de Lançamento da Barreira do Inferno (CLBI), onde se insere a área de estudo. Adaptado da Carta Geológica do Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2017).

2.2. Aspectos Climáticos e Hidrodinâmicos

O clima no Litoral Oriental do RN é do tipo Tropical de verão seco (As) conforme a classificação climática de Köppen, revista por Alvares et al. (2014), com uma temperatura média anual acima de 26°C e de baixa amplitude anual (NIMER, 1989), gradiente de precipitação entre 700mm e 1.500mm (EMPARN, 2017), com estação chuvosa concentrada entre maio e julho (inverno), intensa estação seca entre setembro e dezembro (primavera), fortemente influenciadas pelo deslocamento da Zona de Convergência Intertropical. Trata-se de setor da costa brasileira cujas modificações na linha de costa são do tipo dominadas por ondas e modificadas por marés, formando principalmente praias reflexivas a intermediárias (VITAL et al., 2006).

No padrão de ventos alísios predominam aqueles com forte componente SE, variando sazonalmente entre as direções SSE e ESE, com maiores velocidades médias mensais em torno de 6,5m/s no período de junho a novembro, alcançando 7,5m/s em agosto, e menores velocidades médias mensais em torno de 3,3m/s entre os meses de janeiro e maio (CLBI, 2017).

A análise do clima de ondas realizado para a zona costeira de Natal, com base em modelagem numérica de 60 anos de condições marinhas dispostos no Sistema de Monitoramento Costeiro do Brasil, indicou que as ondas mais frequentes são provenientes da direção 110°, com alturas significativas (H_s) entre 1,3 e 1,7m e período (T_p) em torno de 8s (ALMEIDA et al., 2015). Ademais, as ondas de ESE ocorrem em todas as estações do ano, porém observa-se o aumento na atuação de ondas provenientes de E entre os meses de dezembro e fevereiro (verão). A ação contínua dos ventos alísios de SE é responsável por promover a convergência de ondas oriundas de E e ESE e o intenso transporte longitudinal de sedimentos prevalecente para norte, acompanhando a deriva litorânea, cujo potencial atinge 50.000m³/ano e é intensificado no período chuvoso (junho a agosto), quando ocorre maior remobilização de sedimentos do continente para a faixa litorânea (MATOS et al., 2020).

O regime de marés é de mesomarés semidiurnas, onde a maré astronômica mostra amplitude máxima da ordem de 2,6m, em preamares de sizígia, e a maré meteorológica amplitude máxima de 0,2m (AMARO et al., 2013; ALMEIDA et al., 2015).

3. Materiais e Métodos

Os levantamentos em campo para a varredura tridimensional com o LT foram conduzidos em 21/agosto/2016 (MDT Campo1) e em 24/fevereiro/2017 (MDT Campo2), equivalente a aproximadamente o período de seis meses, assinalando o intervalo entre o inverno austral em 2016 e o fim do verão austral em 2017. O fluxograma metodológico adotado está ilustrado na Figura 3, resumando as atividades em cada etapa de campo e laboratório.

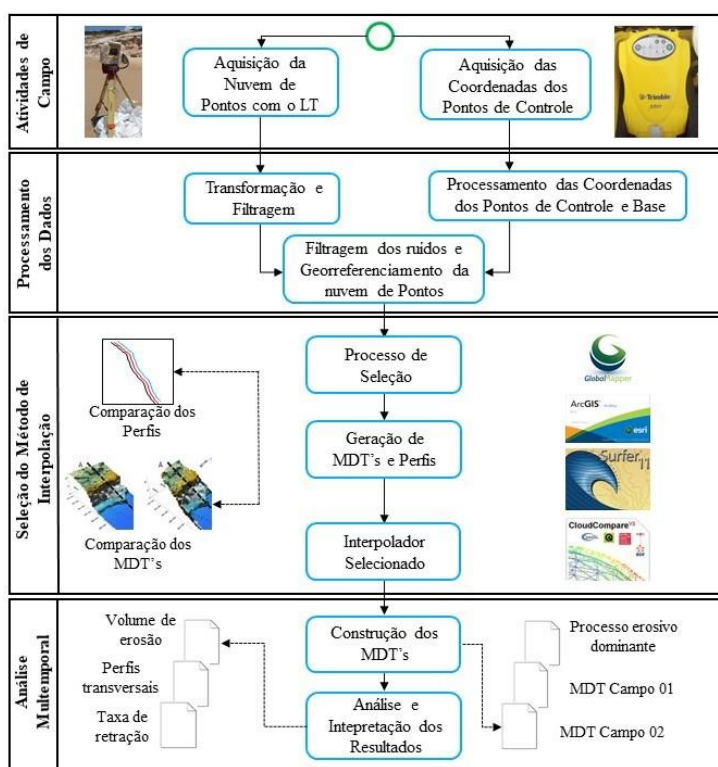


Figura 3. Procedimentos metodológicos adotados neste artigo, com as etapas de atividades de campo, processamento dos dados e das imagens tridimensionais, seleção do interpolador espacial e análises espaciais.

O LT empregado na aquisição da nuvem de pontos tridimensional foi o modelo *ILRIS-3D (Intelligent Laser Ranging & Imaging System)*, da *Optech Inc.* (Canadá), que possui alcance de até 2.000m, taxa de amostragem de 2.000 pontos/s e resolução de 1mm no método estático, com acurácia de distância de $\pm 7\text{mm}$ e angular de $\pm 8\text{mm}$ ambas a 100m, montado estaticamente em tripé sobre base robótica. O georreferenciamento da nuvem de pontos em cada levantamento foi realizado, simultaneamente, por dois receptores GNSS, sendo um modelo Trimble 5700 nas frequências L1 e L2, com precisão horizontal de $3\text{mm}+0,5\text{ppm}$ e vertical de $5\text{mm}+0,5\text{ppm}$, e um modelo Trimble R3 na frequência L1, com precisão horizontal de $5\text{mm}+1\text{ppm}$ e vertical de $5\text{mm}+2\text{ppm}$.

As nuvens de pontos foram georreferenciadas e niveladas em relação ao Sistema Geodésico Brasileiro, no sistema SIRGAS-2000, com base nos marcos geodésicos fixos, já existentes na área de estudo do CLBI, e a curta distância ($<1,0\text{km}$). As coordenadas geodésicas (latitude, longitude e altitude geométrica) e a altitude ortométrica foram definidas para três pontos de controle no terreno: a estação base de instalação do LT e dois alvos de controle, posicionados em triangulação com a estação base, e localizados nas proximidades da escarpa da falésia. Os dados foram processados no *software* Topcon Tools®, obtendo assim as coordenadas geodésicas corrigidas e os erros padrões dos pontos levantados do campo. Para a determinação das altitudes ortométricas foi utilizado aplicativo desenvolvido por Santos e Amaro (2011).

O pós-processamento da nuvem de pontos foi realizado nos *softwares*: *ILRIS PARSE® (Optech Inc.)* e *PolyWorks® (Innovametrics Inc.)*. Com o módulo PARSE foi realizada etapa de limpeza automática dos pontos, com a retirada dos pontos discrepantes ou fora da faixa de interesse do trabalho e, logo após, exportados para o *PolyWorks®*. No *PolyWorks®* o primeiro passo consiste na junção de todos os pontos medidos em campo (alvos de controle e face da falésia) nos módulos AMAlign e AMSurvey. No segundo momento, no módulo AMAlign, as nuvens de pontos são georreferenciadas em coordenadas (x, y, z). O último passo de processamento no *PolyWorks®* foi realizada no módulo AMSurvey para a exportação das nuvens de pontos em formato (*.ASCII), favorável à manipulação em *softwares* de Sistemas de Informações Geográficas (SIG).

As nuvens de pontos foram então processadas nos *softwares* *CloudCompare*, *ArcMap*, *Surfer* e *Global Mapper* para a geração de MDT pelos métodos de interpolação: *Inverse Distance Weighted* (IDW), *Natural Neighbor* (NN), *Kriging* e *Triangular Irregular Network* (TIN) com restrição de *Delaunay*. Tal seleção foi motivada nos *softwares* e nos métodos interpoladores espaciais mais apropriados à representação topológica da falésia da Barreira do Inferno, marcada pela presença de taludes verticais e com incisão basal (Figura 4a, 4b, 4c). Assim, foram definidas seções transversais nas nuvens de pontos de cada levantamento com marcantes complexidades topológicas em diferentes setores da falésia, com grande densidade de pontos (>2 milhões de pontos) e de fácil comparação visual de sutis variações entre os MDT, no detalhamento da geometria e rugosidades dos taludes.

Para o conjunto da face da falésia ativa, após a etapa de seleção do *software* e dos métodos interpoladores espaciais mais adequados, foram elaborados os MDT para cada levantamento em campo (MDT Campo 1, Figura 4b; e, MDT Campo 2, Figura 4c), no *software* *CloudCompare* pelo método TIN fundamentado na triangulação de *Delaunay*. Por meio da análise comparativa entre as seções transversais foi realizado o cálculo de volume erodido e a taxa de retração anualizada do talude da falésia ativa no *ArcMap*, o que auxiliou na identificação do processo erosivo dominante, como proposto por Emery e Khum (1982). Nas demais etapas, foi adotado o *ArcMap* para a elaboração dos MDT e das respectivas análises espaciais.

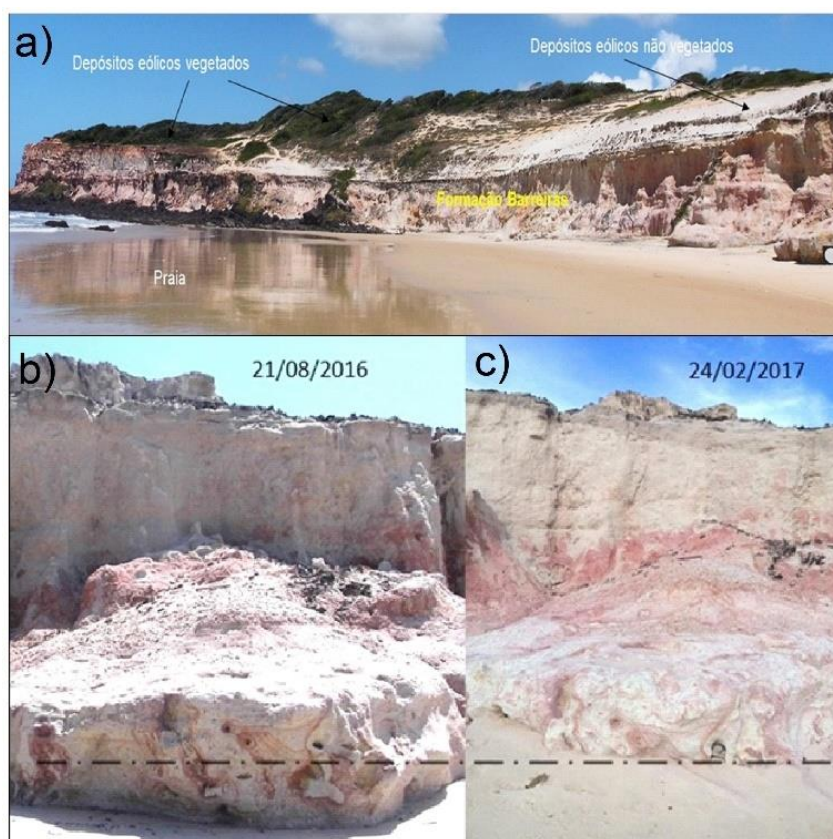


Figura 4. (a) Visão geral da área de estudo com a indicação das unidades geológicas e geomorfológicas. O talude da falésia marinha ativa se apresenta inteiramente sem vegetação, com depósitos de materiais soltos no sopé e a face da praia mostra a inclinação suave; (b) Seção da falésia mostrando o talude verticalizado com marcantes irregularidades, devido à erosão diferencial, no primeiro levantamento de campo em 21/08/2016; (c) A mesma seção da falésia no segundo levantamento de campo em 24/02/2017. Na linha comparativa entre (b) e (c) nota-se a acreção de sedimentos na face de praia no período de curto prazo entre os dois levantamentos de campo.

Como no período decorrido entre os levantamentos ocorreu acreção de sedimentos na face de praia (Figura 4b, 4c), fato que interferiria como fonte de erros no cálculo da taxa de retração da falésia, adotou-se o parâmetro limitador da cota +3,00 m para o cálculo quantitativo de volumes, e da cota +5,00m em trechos com ampla presença de depósitos de materiais soltos (coluviões e *tálus*) em que foi inviável a limpeza na nuvem de pontos.

Depois de conhecida a erosão total no período, pela comparação diferencial entre os MDT de cada um dos levantamentos realizados (MDT Campo 1 e MDT Campo 2), calculou-se a taxa de retração no período anualizada pela fórmula de Young e Ashford (2006), expressa na Equação 1:

$$R = V / (Hc * Lc * T) \quad (1)$$

onde, R= taxa linear de retração (m/ano); V= volume total erodido (m³); Hc = altura média da falésia (m); Lc = comprimento da falésia ao longo da costa (m); T = intervalo de tempo entre consecutivos levantamentos (ano).

4. Resultados e Discussões

A partir das nuvens de pontos foram modelados dez (10) MDT nos *softwares* ArcMap, Global Mapper, Surfer e CloudCompare, pelos métodos de interpolação IDW, NN, *Kriging* e TIN, de acordo com a Tabela 1. Para cada um dos MDT foi elaborado um respectivo perfil transversal AA' e, por meio dele, efetuou-se a comparação com os pontos na nuvem de pontos que originaram os modelos, servindo estes pontos como controle e referência para análise do ajuste e acurácia (Figuras 5, 6, 7, 8). Na etapa de análise comparativa foram escolhidos dois métodos determinísticos exatos (NN, IDW), um método geoestatístico (*Kriging*) e o método baseado em rede de facetas triangulares não sobrepostas e de ângulos mínimos maximizados (TIN).

Tabela 1. Relação dos Modelos Digitais de Terreno gerados para cada um dos *softwares* e os respectivos métodos interpoladores.

Software	Interpoladores			
	TIN	NN	IDW	KRIGING
ArcMap	X	X	X	X
Surfer	X	X	X	X
Global Mapper	X	ND	ND	ND
CloudCompare	X	ND	ND	ND

TIN – Triangular Irregular Network; NN – Natural Neighbor; IDW – Inverse Distance Weighted; ND – Interpolador Não Disponível no *software*.

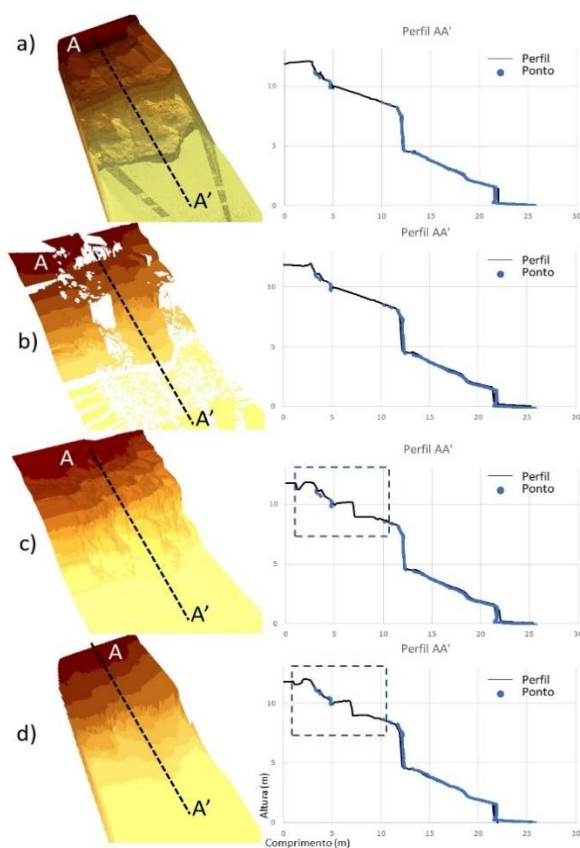


Figura 5. Modelos Digitais de Terreno (MDT) com os perfis transversais comparativos (superfície *vs.* nuvem de pontos) elaborados no ArcMap para os interpoladores: (a) *Triangular Irregular Network* (TIN); (b) *Kriging*; (c) *Inverse Distance Weighted* (IDW); (d) *Natural Neighbor* (NN). Destaca-se a ausência de indicativo de incisão basal em todos os MDT e a interpolação inadequada da porção superior dos MDT com o uso do IDW e o NN.

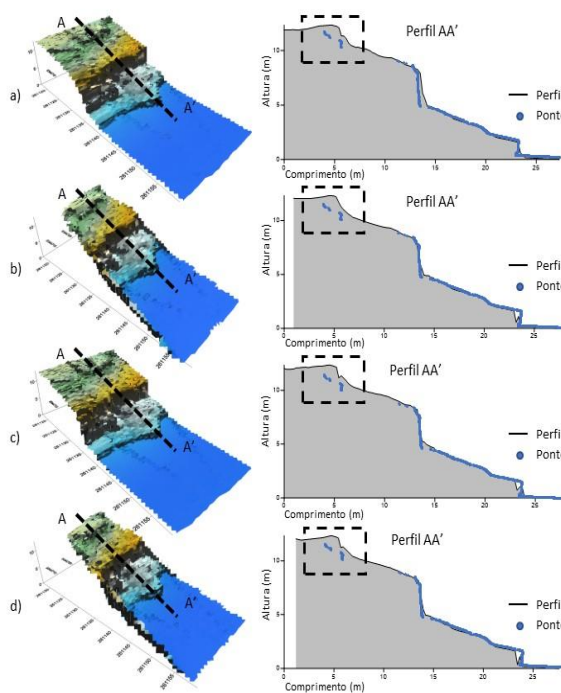


Figura 6. Modelos Digitais de Terreno (MDT) com os perfis transversais comparativos (superfície obtida *vs.* nuvem de pontos) elaborados no *Surfer* para os interpoladores: (a) *Inverse Distance Weighted* (IDW); (b) *Natural Neighbor* (NN); (c) *Kriging*; (d) *Triangular Irregular Network* (TIN). Destaca-se a ausência de indicativo de incisão basal em todos os MDT e a interpolação inadequada da porção superior dos MDT em todos os métodos interpoladores empregados.

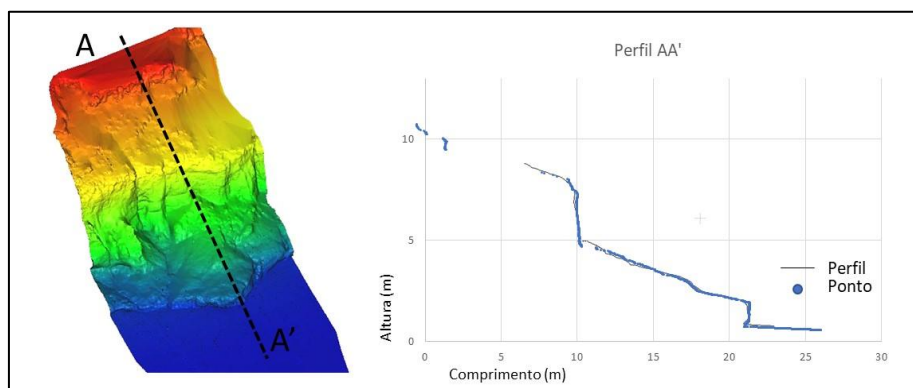


Figura 7. Modelo Digital de Terreno (MDT) com o perfil transversal comparativo (superfície obtida *vs.* nuvem de pontos) elaborado no *CloudCompare* para o método interpolador *Triangular Irregular Network* (TIN). Destaque para a representação de incisão basal no MDT e alta acurácia entre os pontos.

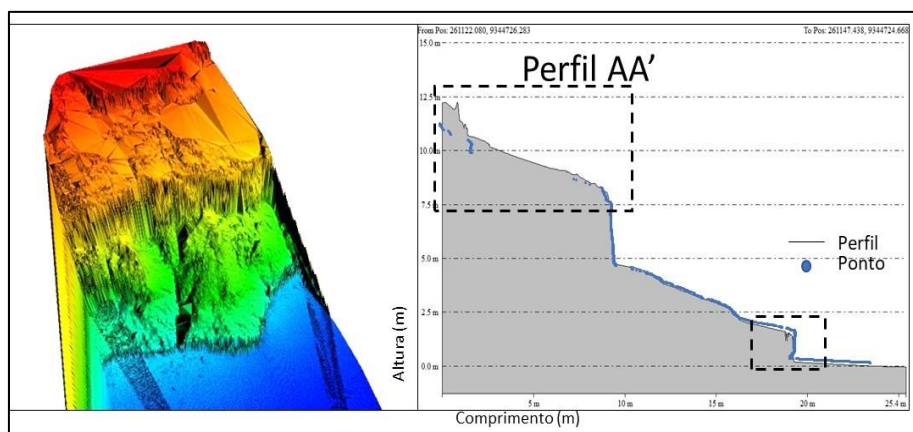


Figura 8. Modelo Digital de Terreno (MDT) com o perfil transversal comparativo (superfície obtida *vs.* nuvem de pontos) elaborado no *Global Mapper* com o método interpolador *Triangular Irregular Network* (TIN). Destaca-se a ausência de incisão basal no MDT e a ausência de acurácia entre os pontos da nuvem de pontos e do perfil na parte superior.

A análise comparativa entre os distintos MDT e os concernentes perfis transversais mostrou que o método interpolador TIN nos *softwares* *ArcMAP* (Figura 5a) e *CloudCompare* (Figura 7) destacaram com maior detalhamento da geometria e das irregularidades no talude da falésia. Os demais MDT foram insatisfatórios, a partir da comparação visual entre a superfície interpolada e a nuvem de pontos, na representação de feições morfológicas nas porções superior e basal do talude. Entre os MDT obtidos com o método interpolador TIN nos *softwares* *CloudCompare* e *ArcMap*, o que melhor exibe visualmente as feições no talude da falésia foi o obtido com o *CloudCompare*, único entre todos os MDT avaliados que modelou as cavas e irregularidades no talude da falésia (Figura 8). Igualmente, é o MDT que modela com melhor acurácia as incisões basais de dimensões métricas no sopé do talude (Figura 9) e proporciona maior convergência entre a superfície e a nuvem de pontos (Figura 10).

O método interpolador TIN, em ambos os *softwares*, desponta-se com alto desempenho, na rapidez do processamento da nuvem de pontos e com qualidade confiável dos MDT na representação da rugosidade das superfícies. Em estudos de quantificação da ação de processos erosivos na orla marítima, especificamente em

erosão/deposição de sedimentos faces de praia, o método de interpolação TIN foi recomendado por Amaro et al. (2012, 2013), Lima et al. (2016) e Santos, Amaro e Santos (2014). Igualmente, o método TIN foi indicado, após comparação com outros métodos interpoladores, para a geração de MDT de alta acurácia de falésias com topologia complexa (ZEILER, 1999; COLLINS e STOCK, 2012; LEI e ATKINSON, 2015). O método geoestatístico *Kriging* realizado no *software ArcMap* mostrou-se igualmente apropriado à representação acertada da topologia da falésia marinha, a exemplo de Terefenko et al. (2018), mas causando maior alisamento na superfície. Ainda, por empreender algoritmos complexos, o interpolador *Kriging* no *ArcMap* demonstrou baixo desempenho, pois exigiu cerca de 28 horas de processamento para uma fração da nuvem de pontos. Outra relevante restrição do *software ArcMap*, como destacou Zeiler (1999), foi a incoerência na geração de superfícies com inclinação negativa, comuns em cavas de falésias verticais, mas possui vantagens na manipulação amigável de dados volumosos, na elaboração de perfis transversais e de volumes comparativos na análise espacial, fatores considerados para uso do *software ArcMap* neste artigo.

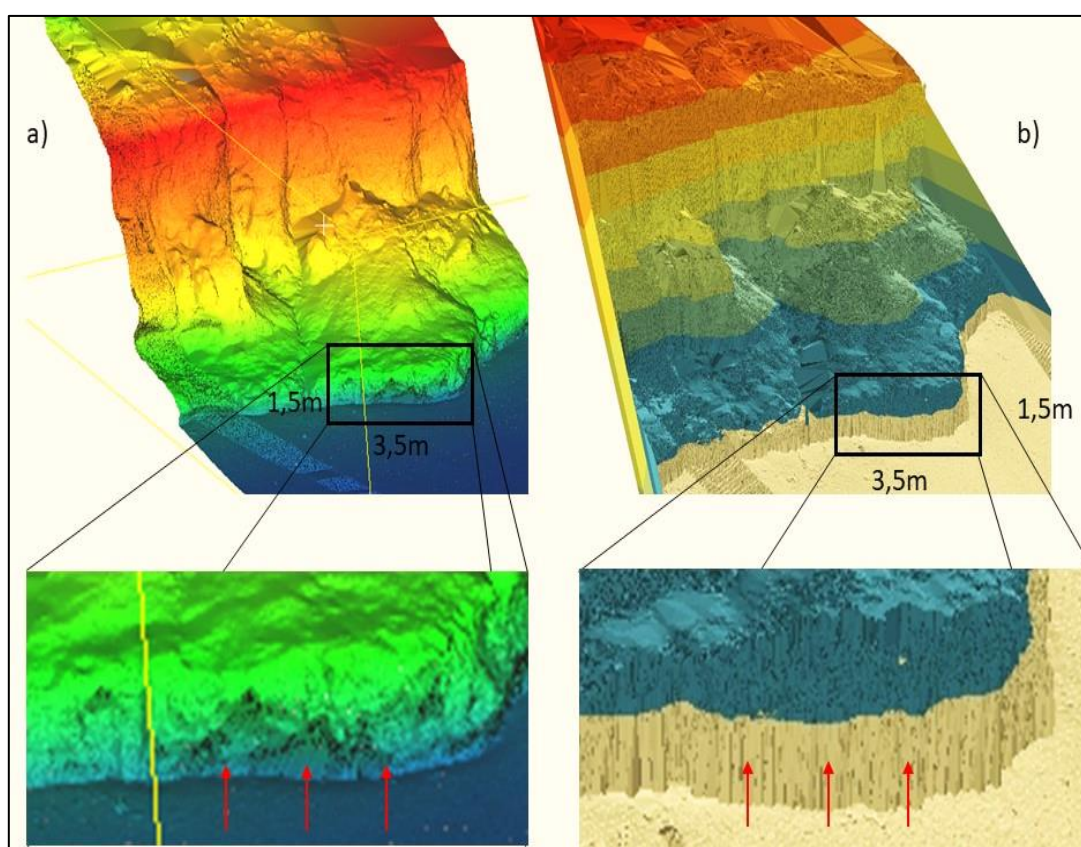


Figura 9. Modelos Digitais de Terreno elaborados no método interpolador *Triangular Irregular Network* (TIN) nos softwares *CloudCompare* (a) e *ArcMap* (b) com destaque para a representatividade das inserções basais de dimensões métricas.

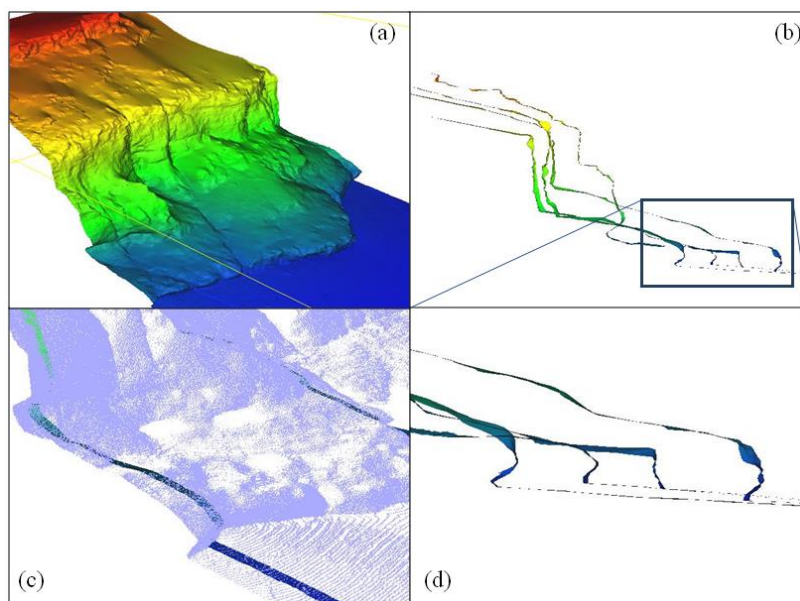


Figura 10. Modelo Digital de Terreno (MDT) elaborado no método interpolador *Triangular Irregular Network* (TIN) no software *CloudCompare*: (a) MDT da seção de teste; (b) Perfis transversais na seção teste; (c) Convergência entre o perfil transversal e a nuvem de pontos; (d) detalhe dos perfis transversais com ênfase para a área incisões basais no sopé da falésia.

A análise espacial comparativa e particularizada entre os MDT Campo1 (21/06/2016) e MDT Campo2 (24/02/2017) indicou alterações significantes nos atributos da morfologia em cinco setores da falésia marinha, desde o Setor 1 a norte ao Setor 5 a sul (Figura 11), e permitiu a quantificação da retração ocorrida no curto prazo. A avaliação comparativa detalhada das superfícies do conjunto da falésia identificou tais setores onde sucederam os maiores volumes erodidos e, logo, permitiu quantificar a taxa de retração anualizada (Tabela 2). A retração total média foi calculada em 23cm no período de curto prazo e aproximadamente $46\pm5,3$ cm no ano, considerando-se a precisão do equipamento LT.

Tabela 2. Setores da falésia da Barreira do Inferno com maiores volumes de erosão e taxas de retrações calculadas a partir do levantamento com o LT e análise espacial para curto prazo, período entre 21/08/2016 e 24/02/2017.

Setor	L (m)	Vol. 1 (m³)	Vol. 2 (m³)	Dif. (m³)	Retração (cm)	Erro (cm)	Retração/ano (cm/ano)
1	99	12541	12072	469	67	$\pm 1,008$	$134\pm 2,0$
2	200	3431	3307	124	7	$\pm 1,008$	$14\pm 2,2$
3*	97	1428	1311	117	17	$\pm 2,625$	$34\pm 5,2$
4*	115	3408	2576	832	60	$\pm 3,738$	$120\pm 7,4$
5	139	9523	9432	91	3	$\pm 5,187$	$6\pm 10,3$
Total	650	30331	28698	1633	23	$\pm 2,646$	$46\pm 5,3$

* Volume quantificado a partir da cota +5,00 m. L - Comprimento; Vol. 1 – Volume de referência obtido no 1º levantamento (21/08/2016); Vol. 2 – Volume de referência obtido no 2º levantamento (24/02/2017); Dif. – Erosão entre os volumes obtidos dos MDT (Vol. 1 – Vol. 2); Retração – Taxa de retração no período de curto prazo entre 21/08/2016 e 24/02/2017; Erro – Erro associado à precisão do equipamento; Retração/ano – Taxa de retração anualizada

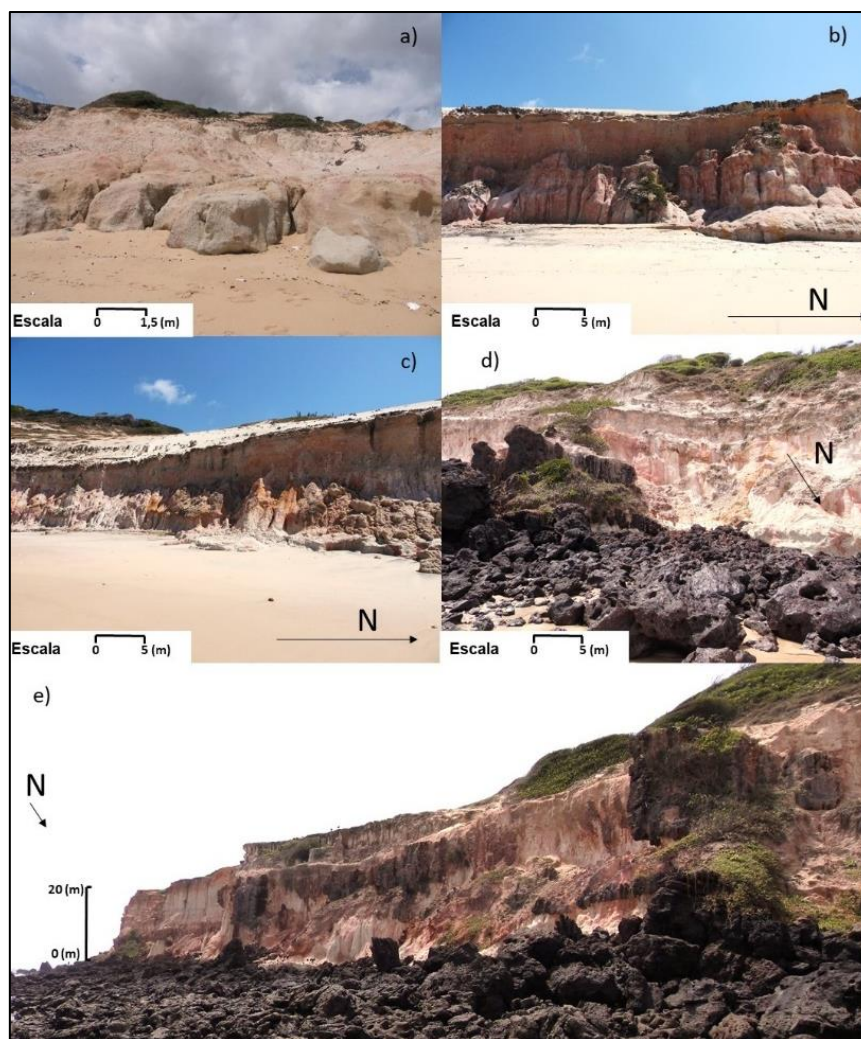


Figura 11. Aspecto geral da falésia da Barreira do Inferno, de acordo com as características de erosão nos setores de 1 a 5, elegidos para representação das nuvens de pontos e MDT: (a) Setor 01 - falésia de perfil suave, com de sulcos e ravinas; (b) e (c) Setor 02 – falésia verticalizada, com alta irregularidade do talude e com materiais soltos oriundos de desmoronamentos; (d) Setor 03 – falésia com declividade variando de 30° a 60°, com material desagregado no sopé do talude, composto por blocos de arenitos e crostas ferruginosas; (e) Setores 04 e 05 – Setores verticalizados com dominância de materiais soltos com cimentação ferruginosa (colúvio e tálus) no sopé da falésia.

O Setor 1 (Figura 11a), trecho de menor altitude (< 6m) mais a norte da falésia da Barreira do Inferno, tem declividade suave, forma superfície de abrasão convexa entre a escarpa frontal ao alcance da maré e a linha de crista recuada e com vegetação. A ação dos processos erosivos subaéreos (chuva, vento, temperatura, escoamento superficial) é dominante nesse setor, gerando sulcos e ravinas profundas impressas sobre as fácies de conglomerados com matriz arenosa e interceptadas por fraturas, com a camada mais resistente de arenitos amarelados na base do perfil. No Setor 2 (Figura 11b, 11c) prevalece a declividade vertical do talude, por vezes até negativa, com muitas irregularidades devido às muitas feições estruturais nas rochas e com desmoronamento de blocos das fácies superiores. Na camada de base composta pela fácies de arenito amarelado de textura muito grossa a média a presença de incisões basais foram marcantes, principalmente no primeiro levantamento, com o menor nível de sedimentos na face da praia, o que favorece os movimentos gravitacionais de massa. A falésia no Setor 3 (Figura 11d) possui declividade que varia entre 30° e 60°, escarpa com muitas irregularidades decorrentes da fragilidade do setor, distinta pelo tipo de fácies e alto grau de estruturação das camadas, diante da ação dos agentes

erosivos marinhos e continentais. O sopé da escarpa é marcado pelo acúmulo de detritos rochosos angulosos com crosta ferruginosa de dimensões variadas, derivados de desmoronamentos, que exercem alguma proteção da base da falésia contra a ação das forças hidrodinâmicas. Os Setores 4 e 5 são os de maiores altitudes (>18m), de escarpas verticais a negativas e com muitas irregularidades (Figura 11e). Nesses setores dominam as fácies da Formação Barreiras e no topo uma segunda linha de crista da falésia mais recuada define a Formação Potengi. No sopé da escarpa ocorrem grandes volumes de blocos soltos de arenitos ferruginosos, que reduzem os efeitos da ação direta da energia dos agentes hidrodinâmicos sobre a falésia. A disposição geomorfológica saliente, rochosa e elevada desse trecho da falésia da Barreira do Inferno atua como promontório na conformação da linha de costa adjacente em arco, que domina para norte na área de estudo, onde estão os demais setores com praia arenosa defrontante. Esta geomorfologia interfere na distribuição da energia do clima de ondas, controlando a intensidade espacial da erosão costeira e o comportamento morfodinâmico da linha de costa, localmente, diante do predomínio de ondas oriundas de E e ESE (ALMEIDA et al., 2015). No arranjo estabelecido, o promontório recebe a maior incidência direta de ondas que então sofrem difração, e mobilizam o fluxo de sedimentos na deriva litorânea para norte. Matos et al. (2020), baseados no fluxo médio sazonal de energia, obtiveram para o transporte longitudinal de sedimentos no inverno (meses com maiores taxas de transporte de sedimentos) valores médios de 18.987m³/ano em frente ao promontório e valores de 6.087m³/ano no trecho onde se situam os Setores 1, 2 e 3. Um fato a ser considerado nesta análise quanto aos resultados alcançados para o volume de erosão e a taxa de retração, é que no período de curto prazo estudado o registro de precipitação média foi de 334mm, que equivale a apenas 27% do esperado para o ano, conforme a média histórica dos últimos 10 anos (EMPARN, 2017).

Nos Setores 1 e 4 as taxas de retrações despontaram-se elevadas quando comparadas às magnitudes históricas de erosão de curto ou longo prazos indicados em outros estudos detalhados realizados ao redor do mundo como, por exemplo, nas falésias marinhas da Califórnia (EUA) que indicou retrações médias de 120cm/ano a 4cm/ano para o topo e talude da falésia, respectivamente (YOUNG, 2018), e taxa máxima de retração no talude da ordem de 50cm/ano (GRIGGS; DAVAR; REGUERO, 2019). Portanto, para sustentação da fiabilidade da metodologia aplicada e dos resultados obtidos, cada um dos MDT de cada setor foi avaliado para os aspectos gerais dos levantamentos de campo e da análise espacial, com base nos processos erosivos atuantes.

No Setor 1 o volume de erosão total foi de 469m³ e a taxa de retração média de 67cm, expressiva para o período (entre os dois levantamentos de campo), valores comparativos ajustados entre os perfis transversais e a superfície do MDT. Contudo, um fator de ponderação relevante na avaliação dos resultados incide na presença de grandes áreas de vazios nas duas nuvens de pontos, provavelmente áreas sombreadas na varredura com os feixes a laser ocorrido, sobretudo, no primeiro levantamento em comparação ao segundo levantamento (Figura 12). A presença de vazios na nuvem de pontos e a discrepância de pontos entre os levantamentos sucessivos, que repercute nos MDT individuais, tiveram como explicação o posicionamento estático do LT em tripé sobre base robótica com relação ao talude da falésia, condição que propicia a ocorrência de sombreamentos nas varreduras. No segundo levantamento, o LT foi instalado mais distante do talude da falésia do que no primeiro levantamento, o que facilitou melhor recobrimento das feições morfológicas e das rugosidades presentes no talude e, com efeito, melhoria na acurácia do MDT elaborado a partir da nuvem de pontos. Assim, neste setor, o volume de erosão total para o período foi superestimado em decorrência dessas variações no cômputo de vazios da nuvem de pontos.

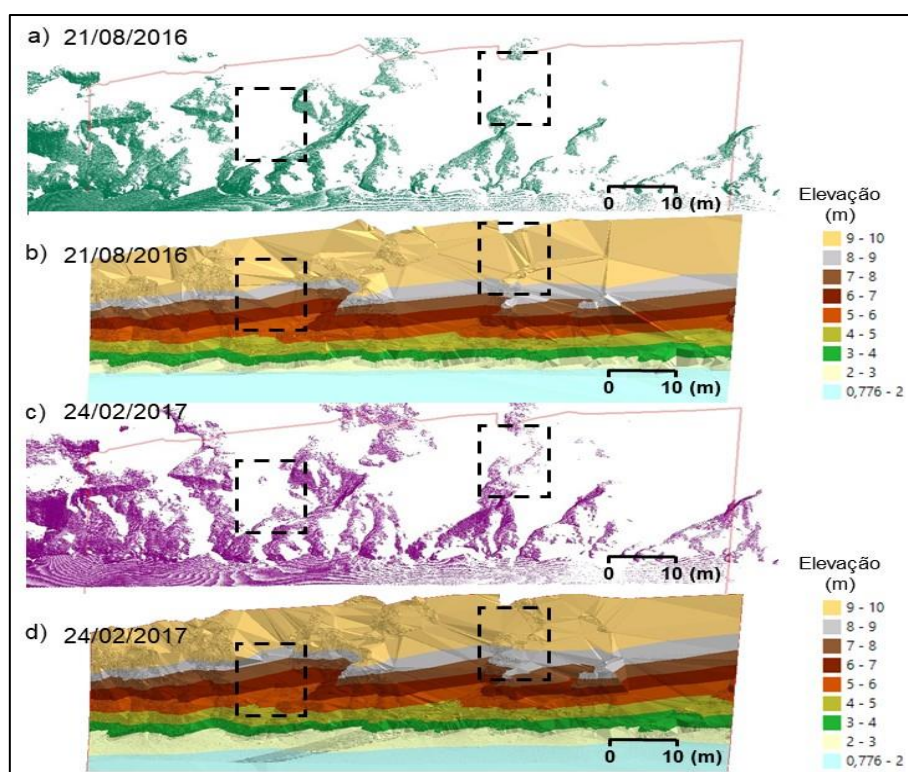


Figura 12. Nuvens de pontos do Setor 1 para os levantamentos de campo de 21/08/2016 (a) e de 24/02/2017 (c), respectivamente. Correspondentes MDT do Setor 1 para os levantamentos de campo de 21/08/2016 (b) e de 24/02/2017 (d). Em destaque, as áreas de vazios nas varreduras com LT, que indicam diferenças entre os levantamentos de campo.

O Setor 2 mostrou excelente cobertura das nuvens de pontos em ambos os levantamentos de campo, com poucas áreas de vazios (Figura 13a, 13c). Este fato decorre do posicionamento diretamente frontal ao Setor 2 do LT em tripé sobre base robótica, permitindo maior recobrimento da varredura a laser e, portanto, maior densidade de pontos. Não obstante, ênfase foi dada para duas áreas de vazios nas nuvens de pontos que mostram diferenças destacáveis nas superfícies dos relativos MDT (Figuras 13c, 13d), sugerindo que tais áreas influenciaram os valores obtidos para o montante do volume de erosão no Setor 2. Assim, novos MDT foram elaborados para ambos os levantamentos desconsiderando as áreas de vazios no contexto das nuvens de pontos, para posterior comparação com os dados prévios, denominado de Setor 2A. Os cálculos de volumes de erosão, taxas de retração e demais estimativas foram refeitas para cada levantamento e constam da Tabela 3. Os resultados obtidos mostraram que desconsiderando as áreas de vazios (Setor 2A) na análise comparativa comparativamente, a taxa de retração resultante é 39% menor, corroborando que o sombreamento inerente ao tipo de varredura com LT, que gera vazios nas nuvens de pontos, foi fonte significativa de erros na avaliação de falésias marinhas ativas com muita rugosidade na superfície do talude, exigindo que nos levantamentos de campo a posição estática da base do LT em tripé sobre base robótica seja alterada para recobrir eventuais sombreamentos. Contudo, por se tratar orla marítima de praias arenosas com declividade suave e em condições de mesomares semidiurnas, as condições propícias para atender a tal exigência quase sempre são inviáveis, já que o piso para instalação estática do tripé é maleável, nem sempre se dispõe mais do que de um equipamento LT, além de que tempo para a varredura e de conexões do GNSS, é abreviado ao período do estofo de maré vazante (MIGUENS, 1996).

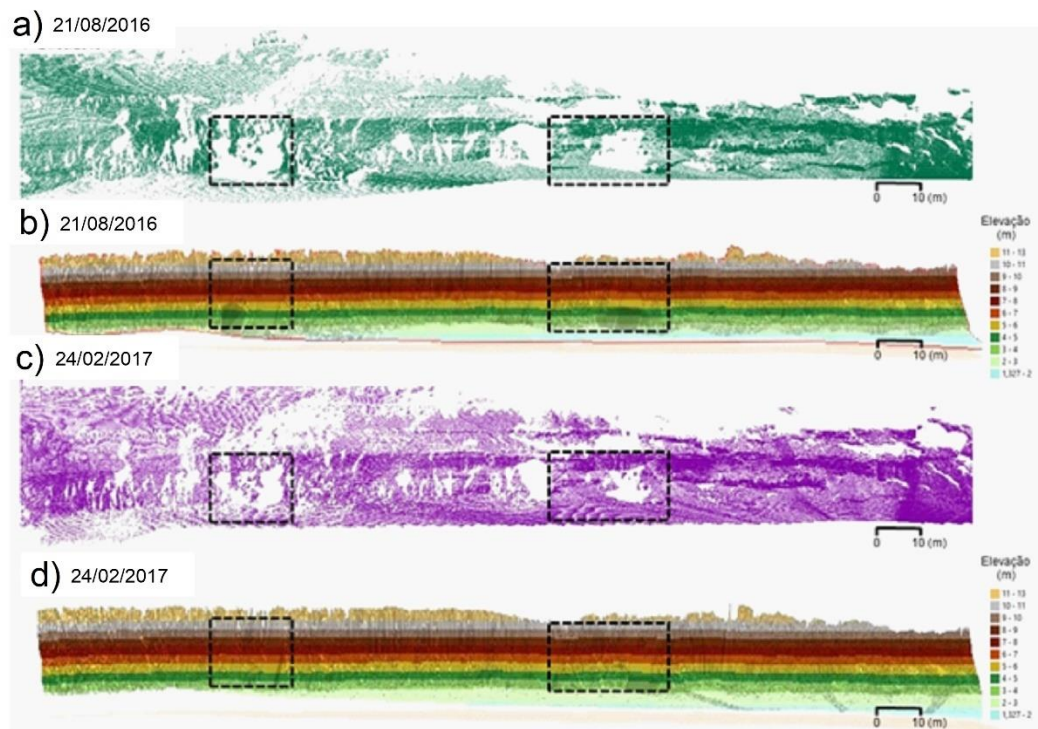


Figura 13. Nuvens de pontos do Setor 2 para os levantamentos de campo de 21/08/2016 (a) e de 24/02/2017 (c), respectivamente. Correspondentes MDT do Setor 2 para os levantamentos de campo de 21/08/2016 (b) e de 24/02/2017 (d). Em destaque, as áreas de vazios nas varreduras com LT que indicam as maiores discrepâncias entre os levantamentos de campo.

Tabela 3. Volumes de erosão e taxas de retrações obtidas a partir dos levantamentos com o LT e análise espacial para curto prazo, período entre 21/08/2016 e 24/02/2017, para o Setor 2 da falésia da Barreira do Inferno com nuvem de pontos prévia (indicado como Setor 2) e recalculados desconsiderando as áreas de vazios de pontos (indicado como Setor 2A).

Setor	L (m)	Vol. 1 (m³)	Vol. 2 (m³)	Dif. (m³)	Área (cm²)	Retração (cm)
2	200	3431	3307	124	1733	7
2A	154	2526	2455	71	1363	5

L - Comprimento; Vol. 1 – Volume de referência obtido no 1º levantamento (21/08/2016); Vol. 2 – Volume de referência obtido no 2º levantamento (24/02/2017); Erosão entre os volumes obtidos dos MDT (Vol. 1 – Vol. 2); Área – Área do talude da falésia considerado no cálculo, com e sem as áreas de vazios; Retração – Taxa de retração no período de curto prazo.

As nuvens de pontos de ambos os levantamentos de campo para o Setor 3 revelaram a ocorrência de duas áreas com vazios em ambas às nuvens de pontos (Figuras 14a, 14c). Os MDT elaborados a partir das nuvens de pontos (Figuras 14b, 14d) mostram diferenças marcantes nessas regiões. Portanto, o mesmo artifício efetivado para o Setor 2 foi adotado para o Setor 3, com a criação de novo MDT desconsiderando as áreas de vazios nos cálculos totais para o Setor 3A, apresentados na Tabela 4. Assim, relativamente entre os dados obtidos para o Setor 3 e para o Setor 3A, a redução na área de varredura considerada foi de 196m² e no volume de 391m³, com a taxa de retração reduzindo de 17cm para 13cm no período.

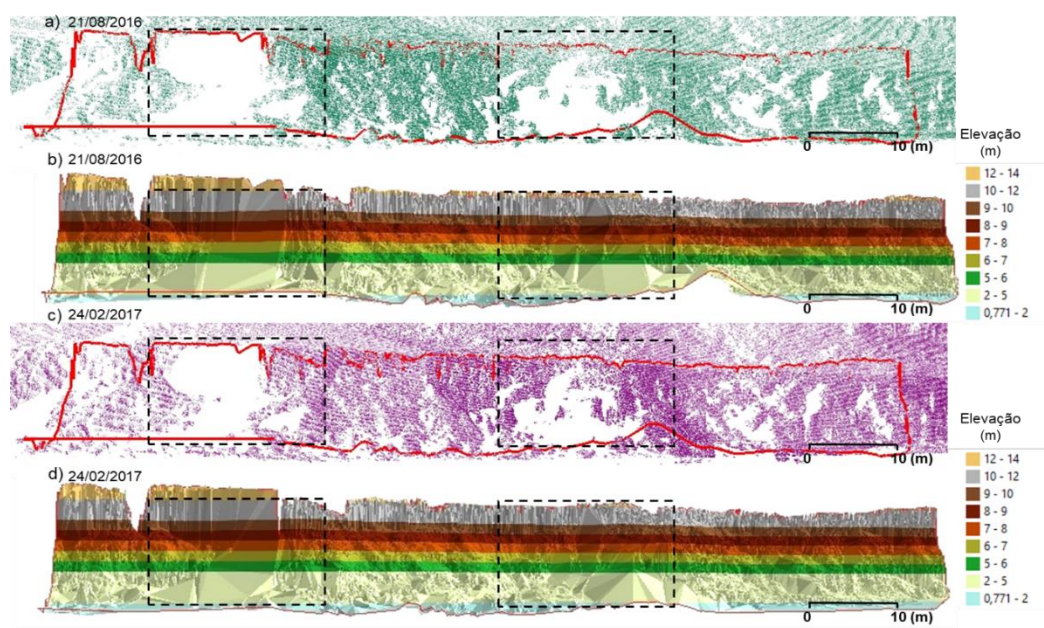


Figura 14. Nuvens de pontos do Setor 3 para os levantamentos de campo de 21/08/2016 (a) e de 24/02/2017 (c), respectivamente. Correspondentes MDT do Setor 3 para os levantamentos de campo de 21/08/2016 (b) e de 24/02/2017 (d). Em destaque, o limite do talude da falésia marinha considerado nos cálculos e as áreas de vazios nas varreduras com LT que indicam as maiores discrepâncias entre os levantamentos de campo.

Tabela 4. Volumes de erosão e taxas de retrações obtidas a partir dos levantamentos com o LT e análise espacial para curto prazo, período entre 21/08/2016 e 24/02/2017, para o Setor 3 da falésia da Barreira do Inferno com nuvem de pontos prévia (indicado como Setor 3) e recalculados desconsiderando as áreas de vazios de pontos (indicado como Setor 3A).

Setor	L (m)	Vol. 1 (m³)	Vol. 2 (m³)	Dif. (m³)	Área (cm²)	Retração (cm)
3	97	1428	1311	117	693	17
3A	71	984	920	64	497	13

L - Comprimento; Vol. 1 – Volume de referência obtido no 1º levantamento (21/08/2016); Vol. 2 – Volume de referência obtido no 2º levantamento (24/02/2017); Erosão entre os volumes obtidos dos MDT (Vol. 1 – Vol. 2); Área – Área do talude da falésia considerado no cálculo, com e sem as áreas de vazios; Retração – Taxa de retração no período de curto prazo.

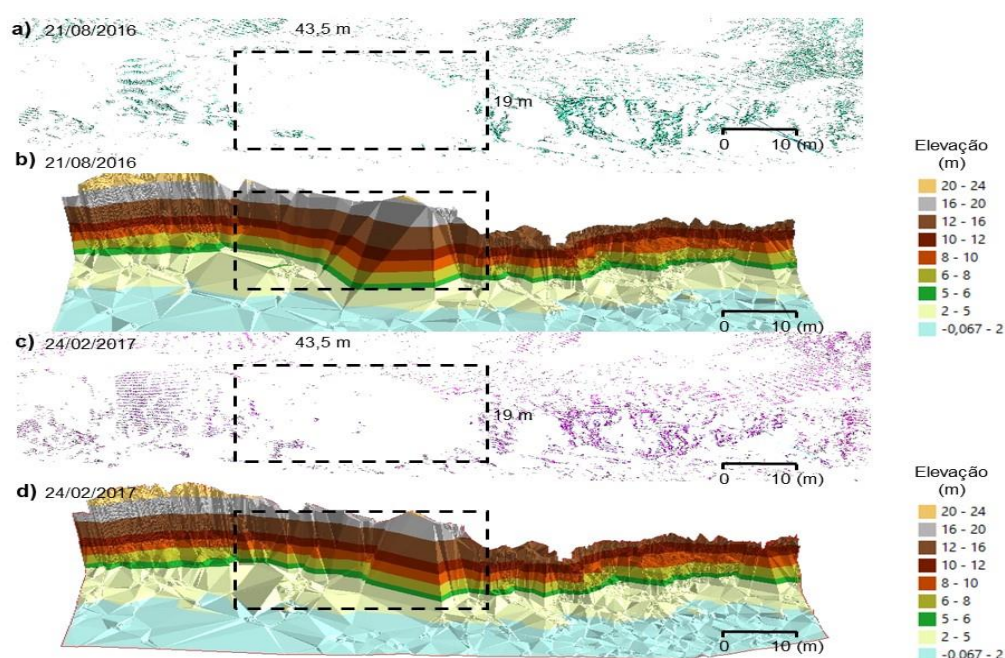


Figura 15. Nuvens de pontos do Setor 4 para os levantamentos de campo de 21/08/2016 (a) e de 24/02/2017 (c), respectivamente. Correspondentes MDT do Setor 4 para os levantamentos de campo de 21/08/2016 (b) e de 24/02/2017 (d). Em destaque, as relevantes áreas de vazios nas varreduras com LT que indicam as maiores discrepâncias entre os levantamentos de campo.

Tabela 5. Volumes de erosão e taxas de retrações obtidas a partir dos levantamentos com o LT e análise espacial para curto prazo, período entre 21/08/2016 e 24/02/2017, para o Setor 4 da falésia da Barreira do Inferno com nuvem de pontos prévia (indicado como Setor 4) e recalculados desconsiderando as áreas de vazios de pontos (indicado como Setor 4A).

Setor	L (m)	Vol. 1 (m ³)	Vol. 2 (m ³)	Dif. (m ³)	Área (cm ²)	Retração (cm)
2	200	3431	3307	124	1733	7
2A	154	2526	2455	71	1363	5

L - Comprimento; Vol. 1 – Volume de referência obtido no 1º levantamento (21/08/2016); Vol. 2 – Volume de referência obtido no 2º levantamento (24/02/2017); Erosão entre os volumes obtidos dos MDT (Vol. 1 – Vol. 2); Área – Área do talude da falésia considerado no cálculo, com e sem as áreas de vazios; Retração – Taxa de retração no período de curto prazo.

A nuvem de pontos para ambos os levantamentos com LT recobriu regularmente o Setor 5 (Figura 16), mesmo com menor densidade de pontos que nos demais setores, sem deixar vazios significativos, indicando a menor taxa de retração para a falésia da Barreira do Inferno, de 3cm no período. Ressalta-se que neste artigo considerou-se, por restrição do alcance do equipamento, um valor médio para o setor de $\pm 5,2$ cm.

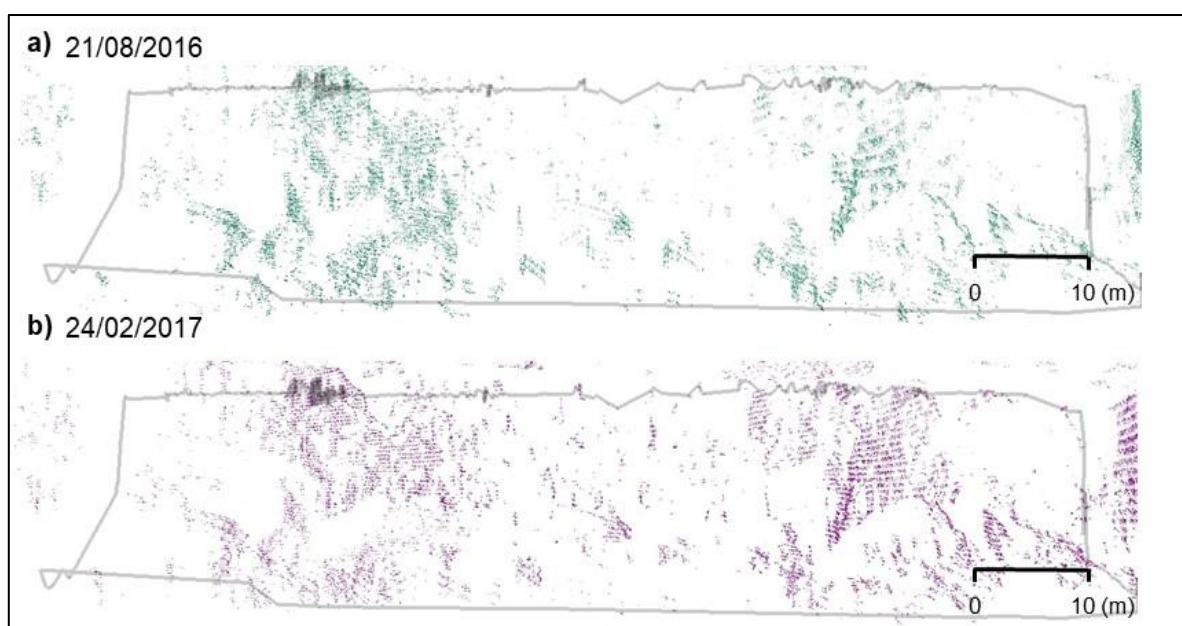


Figura 16. Nuvens de pontos do Setor 5 para os levantamentos de campo de 21/08/2016 (a) e de 24/02/2017 (b), respectivamente. Em destaque, o limite do talude da falésia marinha considerado nos cálculos.

A Tabela 6 compendiou os valores obtidos para os volumes erodidos e taxas de retrações para o período de curto prazo de monitoramento na falésia da Barreira do Inferno, incluindo as considerações sobre as reanálises referentes às áreas de vazios nas nuvens de pontos, considerando apenas os setores específicos e representativos da falésia, ou seja, utilizando os novos MDT. Na compilação final, foram excluídos os dados do Setor 1 por se apresentarem no limite da confiabilidade metodológica, devido aos vários trechos com vazios nas nuvens de pontos, provavelmente devido à alta angularidade ocasionada pelo posicionamento da base com LT. Para o período de curto prazo, o volume de erosão calculado foi de 333 m³, derivando na taxa de retração de 6±3,1cm para o período e de 12±6,2 cm no modo anualizado. Em vista disso, a taxa de retração obtida na reanálise das nuvens de pontos, excluindo as áreas de vazios de pontos em novos MDT, foi 73% menor que aquela obtida anteriormente, revelando a influência dos sombreamentos nos resultados obtidos com LT.

Os resultados indicaram que a falésia, durante o período de curto prazo do monitoramento com LT, com apoio do georreferenciamento com GNSS, apresentou relativa estabilidade sem indícios de processos erosivos intensos, com uma taxa de retração compatível com as obtidas por outros estudos (Tabela 6).

Tabela 6. Volumes de erosão e taxas de retrações obtidas a partir dos levantamentos com o LT e análise espacial para curto prazo, período entre 21/08/2016 e 24/02/2017, para o Setor 4 da falésia da Barreira do Inferno com nuvem de pontos prévia (indicado como Setor 4) e recalculados desconsiderando as áreas de vazios de pontos (indicado como Setor 4A).

Setor	L (m)	Dif. (m ³)	Área (m ²)	Retração (cm)	Erro (cm)	Retração (cm/ano)
2A	154	71	1363	5	±1,1	10±2,2
3A	71	64	497	13	±2,6	26±5,2
4A	70	107	756	14	±3,7	28±7,4
5	139	91	2781	3	±5,2	6±10,4
Total	434	333	5397	6	±3,1	12±6,2

* Volume quantificado a partir da cota + 5,00 m. L - Comprimento; Dif. – Erosão entre os volumes obtidos dos MDT (Vol. 1 – Vol. 2); Retração – Taxa de retração no período de curto prazo; Erro – Erro associado à acurácia do LT; Retração/ano – Taxa de retração anualizada.

5. Conclusões

A avaliação com equipamentos e metodologias que ofereçam valores de alta acurácia sobre o volume erodido e a retração em falésias marinhas, apesar da extensão dessas feições geomorfológicas na costa brasileira e da relevância de suas funções socioeconômicas, ainda é pouco realizada no país. Os levantamentos com equipamentos como o LT acoplado ao georreferenciamento com GNSS têm sido mais comuns, contudo, focados em processos erosivos em praias arenosas urbanas ou falésias marinhas ativas sob o risco alto de movimentos de massa. Entretanto, o crescimento de áreas urbanas e atividades socioeconômicas para as proximidades das falésias, geralmente adjacentes às praias arenosas nos principais centros urbanos costeiros, têm realçado a necessidade de reconhecimento detalhado da magnitude da dinâmica costeira e relação com os processos erosivos da linha de costa.

Este artigo estimou o volume erodido e a retração em período temporal de curto prazo (seis meses) na falésia marinha ativa da Barreira do Inferno formada majoritariamente por rochas da Formação Barreiras, com uso do LT atrelado ao georreferenciamento da nuvem de pontos com GNSS, e avaliação de métodos interpoladores espaciais mais apropriados à representação das feições topológicas em MDT.

Na seleção do método de interpolação, com enfoque na acurácia entre a nuvens de pontos e o MDT, foram usados os *softwares* *CloudCompare*, *ArcMap*, *Surfer* e *Global Mapper* para a geração de MDT pelos métodos de interpolação: *Inverse Distance Weighted* (IDW), *Natural Neighbor* (NN), *Kriging* e *Triangular Irregular Network* (TIN). Os resultados elaborados para cinco setores (Setores 1 a 5, de norte para sul), representativos da falésia marinha, indicaram que o método interpolador TIN dos *softwares* *CloudCompare* e *ArcMap* foi o mais apropriado para representação da falésia, detalhando as irregularidades na superfície e as incisões basais no talude. As incisões basais no talude foram mais bem definidas no MDT obtido com o *software* *CloudCompare*, porém, o *software* *ArcMap* foi empregado nas demais etapas de análise espacial dos MDT. Os resultados confirmaram que, apesar do uso do mesmo método interpolador, as superfícies geradas por diferentes *softwares* apresentaram discrepâncias. Portanto, a seleção apropriada e o uso do mesmo *software* em todas as etapas são fundamentais na manutenção da confiabilidade dos resultados nas análises espaciais. O estudo destacou a importância do efeito do sombreamento gerado nas varreduras com o LT, sobretudo em áreas com grandes irregularidades (ravinas, cavas, declividades negativas, incisões basais) comuns em falésias marinhas ativas. Os sombreamentos são responsáveis pelos vazios nas nuvens dos e interferem no cômputo de volume comparativo entre MDT de levantamentos de campo de curto a longo prazo. Estes vazios foram relevantes para os dados alcançados inicialmente e seus efeitos necessitaram ser considerados durante as análises dos resultados. Devido à existência de sombreamentos nas nuvens de pontos, a taxa de retração foi calculada antes e depois a exclusão dos principais trechos sombreados identificados.

Os cálculos do volume erodido e da taxa de retração no curto prazo foram obtidos na análise comparativa entre os MDT e respectivos perfis transversais nos cinco setores da falésia marinha. Os resultados indicaram que o uso dos MDT corrigidos para os vazios das nuvens de pontos a taxa de retração apresentou valor 73% menor que o valor prévio calculado com o uso das nuvens sem os recortes das áreas de vazios de pontos. A taxa retração total média inicialmente calculada em 23cm no curto prazo e cerca de 46±5,3cm/ano exibiu alteração para 6±3,1cm no curto prazo e de 12±6,2 cm para o período anualizado. Portanto, com os MDT corrigidos os resultados indicaram volume de erosão de 333 m³ no período de curto prazo.

A metodologia praticada neste artigo, com uso de LT de alta acurácia, seleção de método de interpoladores que melhor definissem a superfície do talude e a análise espacial, mostrou-se apropriada para o cálculo do volume erodido e da retração de talude, além de oferecerem subsídios imparciais ao entendimento dos processos morfodinâmicos atuantes nas falésias marinhas ativas do Litoral Oriental do RN. Com o método exposto foi possível quantificar as alterações de curto prazo na paisagem costeira, por meio da quantificação detalhada de parâmetros morfológicos fundamentais à interpretação de processos operantes na zona costeira. Assim, sugere-se que os levantamentos futuros com LT em taludes de falésias marinhas ativas sejam realizados com mais de uma etapa varredura por levantamento, com intuito de incrementar a densidade de pontos e alcançar o máximo de reentrâncias e irregularidades com o recobrimento da nuvem de pontos, reduzindo as áreas de vazios de pontos e, consequentemente os erros na quantificação do volume de erosão.

Contribuições dos Autores: Concepção, V. E. Amaro e J. E. de Almeida Jr.; metodologia, V. E. Amaro e J. E. de Almeida Jr.; software, J. E. de Almeida Jr.; validação, V. E. Amaro, J. E. de Almeida Jr. e M. F. A. de Matos; análise formal, V. E. Amaro e A. C. Scudelari; pesquisa, V. E. Amaro, J. E. de Almeida Jr. e W. V. Gomes; recursos, V. E. Amaro e M. F. A. de Matos; preparação de dados, V. E. Amaro, J. E. de Almeida Jr. e W. V. Gomes; escrita do artigo, V. E. Amaro, J. E. de Almeida Jr., A. C. Scudelari, M. F. A. de Matos e W. V. Gomes; revisão, V. E. Amaro e M. F. A. de Matos; supervisão, V. E. Amaro e A. C. Scudelari; aquisição de financiamento, V. E. Amaro e A. C. Scudelari. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Financiamento: esta pesquisa foi financiada pela cooperação entre a Universidade Federal do Rio Grande do Norte e Centro de Lançamento da Barreira do Inferno da Força Aérea Brasileira, através do projeto “*Estudo Ambiental e Monitoramento de Mudanças Morfológicas Costeiras na Falésia do Centro de Lançamento da Barreira do Inferno - CLBI*”.

Agradecimentos: os autores agradecem o apoio da bolsa do 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*” e ao Laboratório de Geotecnologias Aplicadas, Modelagens Costeira e Oceânica, do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (GNOMO/DEC/UFRN).

Conflito de Interesse: Os autores declaram não haver conflitos de interesse.

Referências

1. ALMEIDA, L.R.; AMARO, V.E.; MARCELINO, A.M.T.; SCUDELARI, A.C. Avaliação do clima de ondas da praia de Ponta Negra (RN, Brasil) através do uso do SMC-Brasil e sua contribuição à gestão costeira. **Revista de Gestão Costeira Integrada**, v. 15, n. 2, p. 135-151, 2015. DOI: 10.5894/rgci532.
2. ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L. DE M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2014. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507.
3. AMARO, V.E.; SANTOS, A.L.S.; SCUDELARI, A.C.; COSTA, B.C.P. Use of terrestrial LiDAR for quantifying morphological changes in Ponta Negra Beach, Natal City, northeast Brazil. In: XI International Symposium for Gis and Computer Cartography for Coastal Zones Management, 11, 2013, Victoria. **Proceedings...** Victoria: IGU. 2013. p. 5-9.
4. AMARO, V.E.; GOMES, L.R.S.; LIMA, F.G.F.; SCUDELARI, A.C.; NEVES, C.F.; BUSMAN, D.V.; SANTOS, A.L.S. Multitemporal Analysis of Coastal Erosion Based on Multisource Satellite Images, Ponta Negra Beach, Natal City, Northeastern Brazil. **Marine Geodesy**, v. 38, p. 1-25, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1080/01490419.2014.904257>
5. ARAÍ, M. A Grande elevação eustática do Mioceno e sua influência na origem do Grupo Barreiras. **Geologia USP Série Científica**, v. 6, n. 2, p. 1-6, 2006. DOI: <https://doi.org/10.5327/S1519-874X2006000300002>
6. ARAÍ, M. A Grande elevação eustática do Mioceno e sua influência na origem do Grupo Barreiras. **Geologia USP Série Científica**, v. 6, n. 2, p. 1-6, 2006. DOI: <https://doi.org/10.5327/S1519-874X2006000300002>
7. ARAÚJO, V.D.; REYES-PERES, Y.A.; LIMA, R.O.; PELOSI, A.P.M.R.; MENEZES, L.; CÓRDOBA, V.C.; LIMA-FILHO, F.P. Fácies e Sistema Depositional da Formação Barreiras na Região da Barreira do Inferno, Litoral Oriental do Rio Grande do Norte. **Geologia USP Série Científica**, v. 6, n. 2, p. 43-49, 2006. DOI: <https://doi.org/10.5327/S1519-874X2006000300006>
8. ARCILLA, A.C.; MARCEL, S.J.F.; KRAUS, N.C. The DUCK94 Nearshore Field Experiment. In: BIRKEMEIER, W.E.; THORTON, E.B. (org.). **Coastal Dynamics**, American Society of Civil Engineers, p. 815-821, 1994. ISBN: 978-0-7844-0043-2
9. 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 Série Científica**. v. 4, n. 2, p. 1-12, 2004. DOI: <https://doi.org/10.5327/S1519-874X2004000200001>
10. BIRD, E.C.F. **Coastal Geomorphology: An Introduction**. Chichester, Wiley, 2008. 436p. ISBN: 978-0-470-51729-1
11. CÂMARA, M.; SCUDELARI, A.C.; AMARO, V.E.; MATOS, M.F.A.; 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**, v. 16, p. 53-79, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.17127/got/2019.16.003>

12. CBD. Convention on Biological Diversity. **Marine Biodiversity: One Ocean, Many Worlds of Life**. Montreal, 2012. 77p. ISBN: 92-9225-410-3
13. CLBI. Centro de Lançamento Barreira do Inferno. Disponível em: < <http://www.clbi.cta.br/internet/index.php/historico> >.
14. CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2ª Ed. São Paulo, Edgar Blücher, 1980. 188p.
15. COLLINS, B.D.; STOCK, G.M. LiDAR-based rock-fall hazard characterization of cliffs. In: Geocongress, 2012, Oakland. **Proceedings...** Oakland: American Society of Civil Engineers, 2012. p. 3021-3030.
16. CROSSLAND, C.J.; KREMER, H.H.; LINDEBOOM, H.J.; MARSHALL CROSSLAND, J.I.; LE TISSIER, M.D.A. **Coastal Fluxes in the Anthropocene**. Berlin, Springer-Verlag, 2005. 94p. ISBN 978-3-540-27851-1
17. DEWEZ, T.J.B.; ROHMER, J.; REGARD, V.; CNUUDE, C. Probabilistic coastal cliff collapse hazard from repeated terrestrial laser surveys: case study from Mesnil Val. **Journal of Coastal Research**, v. 65, p. 702-7070, 2013. DOI:10.2112/SI65-119.1
18. DOODY, P.; ROONEY, P. Special issue – conservation and management of sea cliffs. **Journal of Coastal Conservation**, v. 19, p. 757-760, 2015. DOI:10.1007/s11852-015-0420-x
19. EMERY, K.O.; KUHN, G.G. Sea cliffs: their processes, profiles, and classification. **Geological Society of America Bulletin**, v. 93, p. 644-654, 1982. DOI: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1982\)93<644:SCTPPA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1982)93<644:SCTPPA>2.0.CO;2)
20. EMPARN. Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande Norte. Monitoramento Pluviométrico. Disponível em: <<http://187.61.173.26/monitoramento/monitoramento.php>>
21. FRASER, E.D.G.; DOUGILL, A.J.; MABEE, W.E.; REED, M.; MCALPINE, P. Bottom up and top down: Analysis of participatory processes for sustainability indicator identification as a pathway to community empowerment and sustainable environmental management. **Journal of Environmental Management**, v. 78, p. 114-127, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.04.009>
22. FURLAN, A.A. **Falésias na Formação Barreiras: análise regional e proposta tipológica**. Tese (Doutorado em Geociências) - Programa de Pós-graduação em Geociência, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. 278p.
23. GRIGGS, G.; DAVAR, L.; REGUERO, B.G. Documenting a Century of Coastline Change along Central California and Associated Challenges: From the Qualitative to the Quantitative. **Water**, v. 11, n. 12, p. 26-48, 2019. DOI: [doi:10.3390/w11122648](https://doi.org/10.3390/w11122648)
24. GUTIERREZ, R.; GIBEAUT, J.C.; SMYTH, R.C.; HEPNER, T.L.; ANDREWS, J.R. Precise Airbone LiDAR Surveying for Coastal Research and Geohazards Applications. In: International Archives of The Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2001, Annapolis. **Proceedings...** Annapolis: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2001. ISBN 1-57083-094-0
25. HOBBS, P.R.N.; HUMPHREYS, B.; REES, J.G.; TRAGHEIM, D.G.; JONES, L.D.; GIBSON, A.; ROWLANDS, K.; HUNTER, G.; AIREY, R. 2002. Monitoring the role of landslides in 'soft cliff' coastal recession. In: MCINNES, R.G.; JAKEWAYS, J (org.). **Instability: Planning and Management**. 1ª Ed. London: Thomas Telford, 2002, p. 589-600.
26. HOBBS, P.R.N.; GIBSON, A.; JONES, L.; POULTON, C.; JENKINS, G.; PEARSON, S.; FREEBOROUGH, K. Monitoring coastal change using terrestrial LiDAR. **Geological Society London Special Publications**, v. 345, n. 1, p. 117-127, 2010. DOI: DOI:10.1144/SP345.12
27. JABOYEDOFF, M.; OPIKOFER, T.; ABELLÁN, A.; DERRON, M.H.; LOYE, A.; METZGER R.; PEDRAZZINI, A. Use of LIDAR in landslide investigations: a review. **Natural Hazards**, v. 61, p. 5-28, 2012. DOI 10.1007/s11069-010-9634-2
28. LEI, F.; ATKINSON, P.M. 2015. Accuracy of digital elevation models derived from terrestrial laser scanning data. **Geoscience Remote Sensing Letters**, v. 12, n. 9, p. 1923-1927, 2015. DOI: 10.1109/LGRS.2015.2438394
29. LIMA, F. G. F.; AMARO, V. E.; SANTOS, M. S. T.; SANTOS, A. L. S. 2016. Avaliação de Métodos de Interpolação na Geração de Modelos Digitais de Elevação de Precisão em Zonas Costeiras de Alta Dinâmica Sedimentar. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 68, p. 527-538, 2016. ISSN: 1808-0936
30. MARQUES, F.M.S.F. Sea Cliff instability hazard prevention and planning: examples of practice in Portugal. **Journal of Coastal Research**, v. 56, p. 856-860, 2009. ISSN 0749-0258
31. MATOS, M.F.A.; GURGEL, D.F.; SCUDELARI, A.C.; AMARO, V.E. Estimativa da taxa anual e sazonal do transporte longitudinal sedimentar na zona costeira do litoral oriental do Rio Grande do Norte. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 21, n. 1, 2020. DOI: DOI: <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v21i1.1507>.

32. MICHOU, C.; CARREA, D.; COSTA, S.; DERRON, M.H.; JABOYEDOFF, M.; DELACOURT, C.; MAQUAIRE, O.; LETORTU, P.; DAVIDSON, R. Landslide detection and monitoring capability of boatbased mobile laser scanning along Dieppe coastal cliffs, Normandy. **Landslides**, v. 1, p. 1-16, 2014. DOI:10.1007/s10346-014-0542-5
33. MIGUENS, A.P. Navegação: a ciência e a arte. Rio de Janeiro: DHN, 1996. 538p. DN n. 5.
34. MOURA-FÉ, M.M. 2014. Barreiras: Série, Grupo ou Formação? **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 6, p. 1055-1061, 2014. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v7.6.p1055-1061>
35. NEAL, W. J.; PILKEY, O.H.; COOPER, J.A.G.; LONGO, N.J. Why coastal regulations fail. **Ocean & Coastal Management**, v. 156, p. 21-34, 2018. DOI:10.1016/j.ocecoaman.2017.05.003
36. NALYLOR, L.A.; STEPHENSON, W.J.; TRENHAILE, A.S. Rock coast geomorphology: recent advances and futures research directions. **Geomorphology**, v. 114, n. 1, p. 3-11, 2010. DOI: 10.1016/j.geomorph.2009.02.004
37. NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 1989, 421p.
38. O'DEA, A.; BRODIE, K.L.; HARTZELL, P. Continuous Coastal Monitoring with an Automated Terrestrial Lidar Scanner. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 37, n. 7, p. 2-21, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse7020037>
39. OLSEN, M.J.; JOHNSTONE, E.; ASHFORD, S.A.; DRISCOLL, N.; YOUNG, A.P.; HSIEH, T.J.; KUESTER, F. Rapid response to seacliff erosion in San Diego County, California, using terrestrial LIDAR. In: WALLENDORF, L.; EWING, L.; JONES, C.; JAFFE, B. (Ed.) **Solutions to Coastal Disaster**. Virginia: ASCE, 2008. p. 573-583.
40. PIRAZZOLI, P.A. **Marine notches. In Sea-Level Research: A Manual for the Collection and Evaluation of Data**. Zurich: Van de Plassche, 1986. p. 361-400. ISBN 978-94-009-4215-8
41. POULTON, C.V.L.; LEE, J.R.; HOBBS, P.R.N.; JONES, L.; HALL, M. Preliminary investigation into monitoring coastal erosion using terrestrial laser scanning: case study at Happisburgh, Norfolk. **Bulletin Geological Society of Norfolk**, v. 56, p. 45-64, 2006. ISSN: 0143-9286
42. RAMESH, R.; CHEN, Z.; CUMMINS, V.; DAY, J.; D'ELIA, C.D.; DENNISON, B. Land-ocean interactions in the coastal zone: Past, present & future. **Anthropocene**, v. 12, p. 85-98, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2016.01.005>
43. ROWLANDS, K.; JONES, L.; WHITWORTH, M. Photographic Feature: Landslide laser scanning: a new look at an old problem. **Quarterly Journal of Engineering Geology**, v. 36, p. 155-158, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1144/1470-9236/2003-08>
44. SANTOS, A.L.S.; AMARO, V.E.; SANTOS, M.S.T. Laser Escâner Terrestre aplicado ao monitoramento de mudanças geomorfológicas na praia de Soledade em Macau/RN, Nordeste do Brasil. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 17, 2015., João Pessoa. **Anais... João Pessoa: INPE**. 2015. p. 3730-3739. ISBN 978-85-17-00088-1.
45. SANTOS, A.L.S.; AMARO, V.E.; SANTOS, M.S.T. Terrestrial laser scanner applied to monitoring beach morphological changes in a high energy coastal zone in northeast Brazil. In: International Terrestrial Laser Scanning User Meeting, 7, 2014., Rome. **Proceedings... Rome: Optech**, 2014, p. 1-13.
46. SANTOS, M.S.T.; AMARO, V.E. Rede Geodésica para o monitoramento ambiental costeiro do litoral setentrional do estado do Rio Grande do Norte. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 17, p. 571-585, 2011. ISSN: 1982-2170
47. SANTOS JR., O.F.; SCUDELARI, A.C.; COSTA, Y.D.; COSTA, C.M. 2011. Sea Cliff Retreat Mechanisms in Northeastern Brazil. **Journal of Coastal Research**, v. 64, p. 820-824, 2011. ISSN 0749-0208
48. SHIH, S-M.; KOMAR, P.D. 1994. Sediments, Beach morphology and sea cliff erosion within an Oregon coast. **Journal of Coastal Research**, v. 10, n. 1, p. 144-157, 1994. ISSN 0749-0208
49. SUERTEGARAY, D.M.A. **Terra: feições ilustradas**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2003. 264p.
50. SUGUIO, K. **Dicionário de geologia sedimentar e áreas afins**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998. 222p.
51. TEREFEKO, P.; ZELAYAWZATEK, D.; DALYOT, S.; BOSKI, T.; LIMA-FILHO, F.P. A High-Precision LiDAR-Based Method for Surveying and Classifying Coastal Notches. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 7, p. 295-311, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi7080295>
52. UNEP. **United Nations Environment Programme**. Marine and coastal ecosystems and human wellbeing: A synthesis report based on the findings of the Millennium Ecosystem Assessment. Quênia: PNUMA, 2006. 76p
53. VON GLASOW, R.; JICKELLS, T.D.; BAKLANOV, A.; CARMICHAEL, G.R.; CHURCH, T.M.; GALLARDO, L.; HUGHES, C.; KANAKIDOU, M.; LISS, P.S.; MEE, L.; RAINE, R.; RAMACHANDRAN, P.; RAMESH, R.; SUNDSETH, K.; TSUNOGAI, U.; UEMATSU, M.; ZHU, T. Megacities and Large Urban Agglomerations in the Coastal Zone: Interactions Between Atmosphere. **Land and Marine Ecosystems**, v. 42, p.13-28, 2013. DOI:10.1007/s13280-012-0343-9

54. VITAL, H.; SILVEIRA, I.M.; AMARO, V.E.; MELO, F.T.L.; SOUZA, F.E.S.; CHAVES, M.S.; LIMA, Z.M.C.; FRAZÃO, E.P.; TABOSA, W.F.; ARAÚJO, A.B.; SOUTO, M.V.S. Rio Grande do Norte. In: MUEHE, D. (Org.). **Erosão e progradação no litoral brasileiro**. MMA, p. 155-172, 2006a.
55. VITAL, H.; AMARO, V.E.; SILVEIRA, I.M. Coastal Erosion on the Rio Grande do Norte State (Northeastern Brazil): Causes and Factors Versus Effects and Associated Processes. **Journal of Coastal Research**, v. 39, p. 1306-1309, 2006b. ISSN 0749-0208
56. VOSSelman, G.; MAAS, H.G. **Airborne and Terrestrial. Laser Scanning**. Dunbeath, Whittles Publishing, 2010. 342p. ISBN-13: 978-1439827987
57. WALKER, R.G. Facies models 3. Sandy fluvial systems. **Geoscience Canada**, v. 3, p. 101-109, 1976.
58. YOUNG, A.P., ASHFORD, S.A. Application of airborne LiDAR for seacliff volumetric change and beach sediment budget contributions. **Journal of Coastal Research**, v. 22, n. 2, p. 307-318, 2006. ISSN 0749-020
59. YOUNG, A.P. Decadal-scale coastal cliff retreat in southern and central California. **Geomorphology**, v. 300, p. 164-175, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.10.010>
60. YOUNG, A.P.; CARILLI, J.E. Global distribution of coastal cliffs. **Earth Surf. Process. Landforms**, v. 44, p. 1309-1316, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.4574>.
61. ZEILER, M. **Modeling our World: The ESRI Guide the Geodatabase Desing**. California, ESRI, 1999, 199p. ISBN-13: 978-1589482784