

ANÁLISE DAS MUDANÇAS DA LINHA DE PREAMAR MÁXIMA EM UM TRECHO DA PRAIA DO CUMBUÇO (CAUCAIA-CE) COM APLICAÇÃO DA FERRAMENTA DIGITAL SHORELINE ANALYSIS SYSTEM (DSAS)

Valdir Braga **ABREU**

Mestrando em Geografia da Universidade Estadual do Ceará

Email: valdir.abreu@aluno.uece.br

Orcid: <https://orcid.org/0009-0002-5340-3973>

Davis Pereira de **PAULA**

Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Estadual do Ceará (ProPGeo)

Email: davispp@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-8298-7720>

Jader Onofre de **MORAIS**

Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Estadual do Ceará (ProPGeo)

Email: jader.onofre@uece.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-3856-1287>

Recebido

Junho de 2023

Aceito

Junho de 2023

Publicado

Março de 2024

Resumo: A linha de costa consiste no limite entre a porção emersa e a porção submersa, e esta é extremamente dinâmica e sensível no espaço e no tempo as forças naturais e antrópicas. Desta forma, a crescente demanda pelo uso dos recursos litorâneos e o adensamento populacional no litoral causa impactos significativos na localização da linha de costa, acarretando desequilíbrios concernentes ao balanço de sedimentos e ao patrimônio edificado. Este artigo visa o monitoramento da linha de costa utilizando a linha de preamar máxima ou alcance máximo das marés, um indicador visivelmente discernível ao longo da faixa de praia. Portanto, foi analisado um trecho costeiro arenoso situado na Praia de Cumbuco de 1.5 km de extensão, no município de Caucaia, estado do Ceará, Nordeste do Brasil. O comportamento deste indicador foi analisado ao longo de um período anual (fevereiro/2022 a janeiro/2023), com subsídio de um GNSS-RTK permitindo o caminhamento sobre o espraiamento máximo visível na faixa de praia. As taxas foram calculadas no Digital Shoreline Analysis System

(DSAS) v5.0 – extensão ESRI, ArcGis, utilizando os parâmetros Linear Regration Rate (LRR) e Net Shoreline Moviment (NSM). Os resultados apontaram uma tendência erosiva no trecho estudado de 54,48% e 51,38% e recuo médio de -2,98m e -2,16m com base nas taxas LRR e NSM, respectivamente. Os dados obtidos por meio do software corroboram com a variação na escala de metros observadas durante o estudo, auxiliando no diagnóstico de áreas com recuo da linha de costa e da dinâmica local.

Palavras-chave: Linha de Costa; Linha de Preamar Máxima; DSAS; monitoramento costeiro.

ANALYSIS OF THE CHANGES IN THE MAXIMUM HIGH TIDE LINE IN A STRETCH OF CUMBUCO BEACH (CAUCAIA-CE) WITH THE APPLICATION OF THE DIGITAL SHORELINE ANALYSIS SYSTEM (DSAS) TOOL

Abstract: The shoreline is the boundary between the exposed and submerged parts, and it is extremely dynamic and sensitive in space and time to natural and anthropogenic forces. Thus, the increasing demand for the use of coastal resources and the population densification on the coast cause significant impacts on the position of the shoreline, leading to imbalances in the sediment balance and the built heritage. This paper aims to monitor the shoreline using the high tide line, a visible indicator along the beach strip. Therefore, a sandy coastal strip located at the 1.5 km long Cumbuco Beach, in the municipality of Caucaia, State of Ceará, Northeast Brazil, was analyzed. The behavior of this indicator was analyzed over an annual period (February/2022 to January/2023), with the subsidy of a GNSS-RTK allowing the walk over the maximum visible spread on the beach strip. The rates were calculated in the Digital Shoreline Analysis System (DSAS) v5.0 - ESRI extension, ArcGis, using the parameters Linear Regration Rate (LRR) and Net Shoreline Movement (NSM). The results indicated an erosive trend in the studied section of 54.48% and 51.38% and an average retreat of -2.98m and -2.16m based on LRR and NSM rates, respectively. The data obtained through the software corroborate with the variation in the scale of meters observed during the study, assisting in the diagnosis of areas of shoreline retreat and local dynamics.

Keywords: Shoreline; High Water Line; DSAS; coastal Monitoring.

ANÁLISIS DE LOS CAMBIOS DE LA LÍNEA DE PLEAMAR MÁXIMA EN UN TRAMO DE LA PLAYA DE CUMBUCO (CAUCAIA-CE) CON APLICACIÓN DE LA HERRAMIENTA DIGITAL SHORELINE ANALYSIS SYSTEM (DSAS)

Resumen: La línea de costa es el límite entre las porciones emersa y sumergida, extremadamente dinámica y sensible en el espacio y el tiempo a los forzamientos naturales y antrópicos. Los procesos naturales están relacionados con la subida acelerada del nivel del mar, los cambios geotectónicos, las catástrofes naturales, las inundaciones costeras, los temporales, la erosión-acreción, además de la acción de los condicionantes oceanográficos (marea, corriente oceánica y oleaje) y el viento, mientras que la actividad humana está inducida por la urbanización, la explotación de los recursos naturales y las actividades turísticas. De este modo, la creciente demanda de uso de los recursos costeros y la densificación de la población causan impactos significativos en la localización de la línea de costa, provocando desequilibrios en el balance de sedimentos y en el patrimonio construido. El objetivo de este trabajo es realizar un seguimiento a corto plazo de la línea de costa a una escala espacial corta, utilizando la línea de pleamar máxima o alcance máximo de la marea, un indicador visiblemente perceptible a lo largo de la franja de playa. Para ello, se analizó un tramo costero arenoso situado en la Playa de Cumbuco, en el municipio de Caucaia, Estado de Ceará, Nordeste de Brasil. Se analizó el comportamiento de este indicador a lo largo de un período anual (febrero/2022 a enero/2023),

con subsidio de un GNSS-RTK que permitió caminar sobre la extensión máxima visible en la franja de playa. Los índices fueron calculados en Digital Shoreline Analysis System (DSAS) v5.0 - extensión ESRI, ArcGis, utilizando los parámetros Linear Reclamation Rate (LRR) y Net Shoreline Movement (NSM). Los resultados indicaron una tendencia erosiva en el tramo estudiado del 54,48% y 51,38% y un retroceso medio de -2,98m y -2,16m en base a las tasas LRR y NSM, respectivamente. Los datos obtenidos a través del software corroboran la variación en la escala de metros observada durante el estudio, ayudando en el diagnóstico de áreas con retroceso de la línea de costa y dinámica local.

Palabras llave: Línea de costa; Línea de Pleamar Máxima; DSAS; monitoreo costeiro.

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o litoral tem sido um dos subsistemas mais intervencionados pelo homem na superfície terrestre, concentrando estruturas urbanas residenciais, empresariais e turísticas. A zona costeira abriga 53% da população mundial (Barragan; De Andrés, 2015; Toure *et al.*, 2019; Dewi; Bijker, 2020) e 15 das 20 megacidades (>10 milhões da população) do mundo estão situadas neste ambiente (Luijendijk *et al.*, 2018). Portanto, estressores humanos têm causado impactos negativos nos ambientes costeiros e fluviais, provocando um desequilíbrio no abastecimento sedimentar das praias, com consequente efeito sobre as mudanças no posicionamento da linha de costa (De Andrés *et al.*, 2018; Martinez *et al.*, 2019; Awad, 2021; Lämmle *et al.*, 2022).

As mudanças na linha de costa também são acarretadas por forçamentos naturais - ondas, correntes oceânicas, vento, maré, geotectônica, erosão e desastres naturais - (Castelle *et al.*, 2018; Awad, 2021; Hossain *et al.*, 2022). Ademais, o agravamento dos impactos das mudanças climáticas com o aumento do nível do mar e das tempestades, intensificam a erosão costeira, resultando em perdas econômicas e afetando as atividades turísticas, sociais e recreacionais. Além disso, há perda do patrimônio edificado, além da degradação do ambiente litorâneo, alterando a morfologia de praias, falésias e dunas, por exemplo. De acordo com Luijendijk *et al.* (2018), em seu estudo sobre o estado das praias, 24% sofreram déficit sedimentar, com taxas de recuo de 0,5m/ano, enquanto 28% apresentaram estágios progradante e 48% em estabilidade.

À medida que o nível do mar sobe, as praias são erodidas e ficam presas entre a elevação do mar e a orla urbana (Griggs *et al.*, 2020). Nesse caso, a linha de costa recua gradativamente para interior até entrar em conflito com os equipamentos urbanos instalados ao longo da frente marinha (Petrișor *et al.*, 2020), tornando o espaço de praia com areia cada vez mais estreito ou inexistente, em casos mais graves. Essa sensação de “aperto costeiro” ameaça as praias do

mundo inteiro (Griggs; Patsch, 2019), no Brasil e, especificamente, no Ceará, a realidade não é diferente.

Devido a sua natureza dinâmica, o estudo da linha de costa é essencial para o planejamento e o gerenciamento costeiro integrado e sustentável. Daí a importância de monitorar as mudanças na linha de costa, tendo critérios e métodos científicos claros e eficientes. Os indicadores podem ser qualitativos ou quantitativos ou mistos, podem ter o emprego de técnicas numéricas e computacionais para a sua aplicabilidade (Van Der Werff, 2019; Kilar, 2023). Os indicadores matemáticos estão atrelados ao Datum de maré da localidade, por exemplo, enquanto os físicos, podem constituir características morfológicas e não-morfológicas. Na literatura, um dos indicadores mais utilizado para definição do posicionamento da linha de costa é o alcance das ondas, gerando um limite entre visível entre areia seca e molhada (Pajak; Leatherman, 2002).

A escolha do indicador e do aparato metodológico utilizado para a identificação da linha de costa possuem grande importância para a interpretação correta das mudanças no seu posicionamento. Existem inúmeras técnicas para monitorar a mudança da linha de costa, incluindo o uso de imagens de satélites (Esmail *et al.*, 2019; Touré *et al.*, 2019; McAllister, 2022), levantamento aerofotogramétrico (Di Paola, *et al.*, 2022) e levantamento de campo por GPS de precisão (Barros, 2018; Splinter *et al.*, 2018). Pajak e Leatherman (2002) observaram que a utilização de um método com GPS geodésico, oferece maior precisão (submétrica) ao identificar características peculiares da linha costeira de interesse em relação às imagens aéreas.

Desse modo, esse estudo tem como objetivo compreender o dinamismo da linha de costa a partir do mapeamento da linha máxima de preamar ou linha máxima de alcance das ondas em um trecho do litoral do Cumbuco, em Caucaia-CE, com emprego da ferramenta *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS). Trata-se de uma ferramenta largamente empregada em estudos que envolvem a dinâmica e o comportamento da linha de costa (Nassar *et al.*, 2019; Sam; Gurugnanam, 2022).

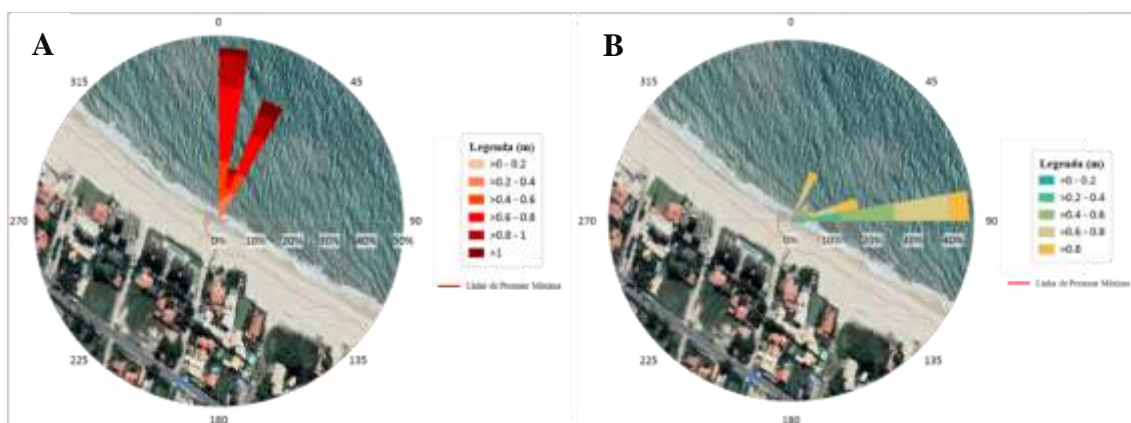
MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

A Praia do Cumbuco está localizada no município de Caucaia (Ceará - Brasil), Região Metropolitana de Fortaleza – RMF (Figura 1), distante aproximadamente 25 km da capital Fortaleza, tendo o seu acesso realizado pela CE-090. Trata-se do trecho turístico desse município, em que o desenvolvimento urbano é pautado pelo crescimento turístico e pela

oceanográficos, as ondas no litoral do Cumbuco são predominantemente do tipo *Sea*. A moda dominante é rompida com a chegada de ondas de longo período advindas do Hemisfério Norte, conhecida como ondas do tipo *Swell* (Figura 2). Morais *et al.* (2006) destacam que as ondas no Ceará apresentam uma forte componente de Leste, com direções variando nos quadrantes E-NE e E-SE, na qual possui estreita relação com a direção dos ventos na costa. As marés são classificadas como semidiurnas caracterizadas pela ocorrência de duas preamares e duas baixamars com amplitudes desiguais durante o período de um dia lunar (24h 50min), variando entre 2 e 4 metros, ou seja, características de um ambiente de mesomaré (MORAIS, 1980).

Figura - Caracterização das ondas na localidade: a) swell; b) sea.



Fonte: *Surfguru*, 2023. Imagem Elaborado pelos autores.

O EXPERIMENTO DE CAMPO

O estudo em questão é empírico, baseado na realização de experimentos de campo, com coleta de dados em tempo real. O objetivo do uso desse método empírico é obter evidências empíricas para analisar e quantificar o comportamento da variabilidade da linha de costa em um trecho da Praia do Cumbuco. Nesse sentido, em dezembro de 2021, foi realizado um reconhecimento de campo para delimitação do espaço amostras da pesquisa. Considerando os aspectos morfológicos e as formas de uso e ocupação, foi definida uma extensão de 1,5 km de linha de costa para monitoramento em escala anual.

Os experimentos de campo foram realizados entre os meses de fevereiro/22 e janeiro/23 (Tabela 1), compreendendo a sazonalidade das forçantes naturais regionais. Todos os experimentos de campo foram realizados em nível máximo de preamar. Essas informações foram obtidas no portal on-line da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN). Os valores

previstos das ondas foram capturados na plataforma digital do SurfGuru e transpassados para planilha de ondas do projeto.

Tabela 1 – Datas das campanhas de campo e informações de marés e ondas.

Campanhas de campo: Fevereiro 2022 – Janeiro 2023							
Meses	Datas	Altura - Hs (m)	Período (s)	Direção (°)	Orientação	Preamar (m)	Baixamar (m)
Fev	01/02/22	0,8	9,0	21,8	NNE	2,8	0,2
Mar	04/03/22	1,2	15,8	3,7	N	2,9	0,2
Abr	18/04/22	0,6	13,7	6,8	N	3,0	0,0
Mai	16/05/22	0,6	12,2	7,1	N	3,1	0,0
Jun	14/06/22	0,5	8,1	40	NNE/E	3,1	0,0
Jul	13/07/22	0,7	8,7	35,5	NNE	3,1	0,0
Ago	11/08/22	0,6	6,4	82,3	ENE	3,1	0,0
Set	12/09/22	0,8	8,2	66,1	ENE	3,1	0,1
Out	26/10/22	0,8	12,7	25,5	NE	3,1	0,1
Nov	23/11/22	0,9	8,5	49	NE	2,9	0,3
Dez	23/12/22	0,9	13,5	4,8	N	2,8	0,3
Jan	21/01/23	0,8	11	25,3	NE	3,1	0,1

Fonte: Elaborado pelos autores.

Para auxiliar no monitoramento da linha de costa, foram obtidas imagens por meio de levantamento aéreo utilizando uma Aeronave Remotamente Pilotada – ARP entre os meses de fevereiro/22 e janeiro/23. O modelo de quadricoptero utilizado é da *Dji Phantom 4 Pro V2*. Os planos de voos foram programados no *Software DroneDeploy* com sobreposição frontal e lateral de 75%. A área total recoberta pelo voo foi de 65 há, compreendendo início da malha urbana, dunas frontais e faixa de praia. O tempo total de voo foi de 30 minutos.

Para melhorar precisão do bloco fotogramétrico foram utilizados 15 pontos de controle e 5 pontos de checagem. Esses pontos foram georreferenciados via GPS-Geodésico, tendo sua correção realizada através do método PPP (Processamento por Ponto Preciso) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). A acurácia do levantamento foi realizada através do *software* geoPEC da Universidade Federal de Viçosa.

O processamento fotogramétrico das imagens foi realizado no *software* Agisoft Metashape 1.8, permitindo a construção da nuvem esparsa e densa de pontos, modelo digital de superfície ou de terreno e o ortofotomosaico. Após essa geoconstrução, os dados de mapeamento da linha de costa foram sobrepostos as imagens, permitindo observar algum tipo

de erros ou distorção na aquisição dos dados de campo referentes a identificação da linha de preamar máxima.

DETECÇÃO DA LINHA DE PREAMAR MÁXIMA

Para fins de monitoramento, foi utilizado o indicador da Linha Máxima de Preamar (LMP) de sizígia. Esse é o indicador mais utilizado na literatura para esse tipo de estudo (Pajak; Leatherman, 2002; Schweitzer, 2013; Aladwani, 2022; Bengoufa *et al.* 2022).

Para a obtenção dos dados referentes a linha de costa, foi utilizado um par de receptores GNSS (*Global Navigation Satellite System*) de alta precisão, operando na constelação GPS e modo Cinemático ou RTK (*Real Time Kinematic*). O receptor base (estático) foi instalado sobre a crista de uma duna frontal, cuja as coordenadas estão disponibilizadas na tabela 2, enquanto o receptor rover (móvel) foi deslocado ao longo do limite máximo entre a areia seca e a areia molhada, com auxílio de uma coletora para a coleta dos pontos.

Tabela 2 - Localização geográfica em UTM da Base.

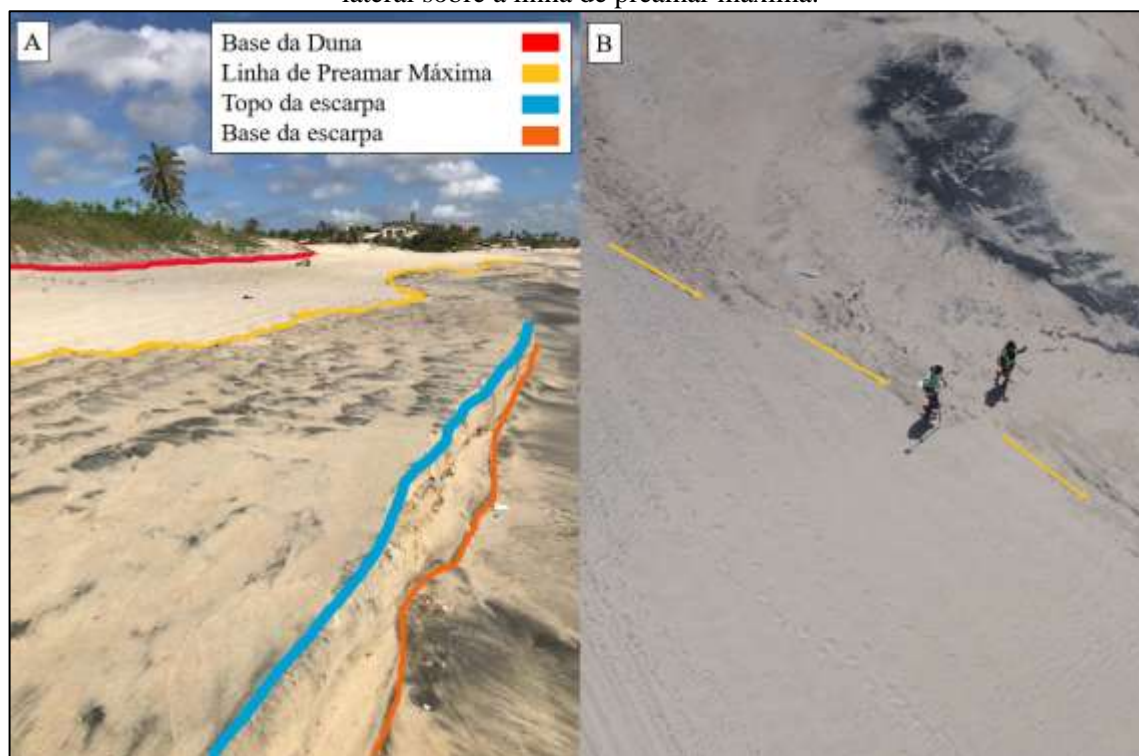
SETOR	UTM – N (m)	UTM – E (m)	ALTITUDE (m)
BASE	9598564.301	531512.464	7,20

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dados obtidos foram processados através do método do Posicionamento por Ponto Preciso do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - PPP/IBGE. Com isto as informações de altitude, longitude e latitude foram transladadas, rotacionadas e escalonadas com precisão planimétrica de 0,009 cm e altimétrica de 0,010 cm (IBGE, 2009). Por fim, os dados da coletora foram corrigidos no *software Field Genius* resultando em uma planilha em formato “.csv”, com dados corrigidos e prontos para serem trabalhados em um ambiente do Sistema de Informações Geográficas – SIG.

Após o armazenamento das informações referentes a Linha Máxima de Preamar em uma base de dados, foi possível verificar as variações do critério seco/molhado utilizando a ferramenta *Digital Shoreline Analysis System* – DSAS v5.0. A Figura 3 mostra os indicadores presentes na localidade e a aplicação do método de caminhamento sobre a LMP.

Figura 3 - A) Indicadores de linha de costa presente no trecho costeiro estudado; B) Caminhamento lateral sobre a linha de preamar máxima.



Fonte: Elaborado pelos autores.

QUANTIFICAÇÃO DA LINHA DE COSTA: DIGITAL SHORELINE ANALISYS (DSAS).

O DSAS trata-se de uma ferramenta que calcula as variações da linha de costa, a qual pode ser aplicada em escalas espaciais de natureza micro. A ferramenta é vinculada ao *software* Arcgis, desenvolvido em 1990, sendo possível realizar cálculos estatísticos da sua variação temporal (Thieler *et al.*, 2009). O Quadro 1 descreve sucintamente os métodos estatísticos aplicados através da ferramenta DSAS.

Desta forma, foi criada uma linha de base paralela à orientação geral das linhas de preamar máxima (LPM) obtidas em campo por meio da ferramenta *buffer* no ArcGIS antes da obtenção dos transectos. A obtenção da baseline por meio do *buffer* é o método mais confiável e preciso (HOSSSEN e SULTANA, 2023). No primeiro momento a ferramenta de geoprocessamento *mesclagem* (*merge*) combinou todas as linhas de costa (de fevereiro/2022 a janeiro/2023), para a obtenção da linha de base a 150m em direção do oceano. O mês de fevereiro/2022 foi utilizado como base. Posteriormente, alguns campos de atributo, como OBJECTID, SHAPE, SHAPE Length, ID, Group_ e Search Distance, foram criados para obter o cálculo da linha de base. As informações são integradas a análise para estimar a mudança da

linha de costa, tendo acreção representada com valores positivos e erosão denotado por um valor negativo.

Quadro 1 - Métodos estatísticos do *Digital Analysis Shoreline System* (DSAS)

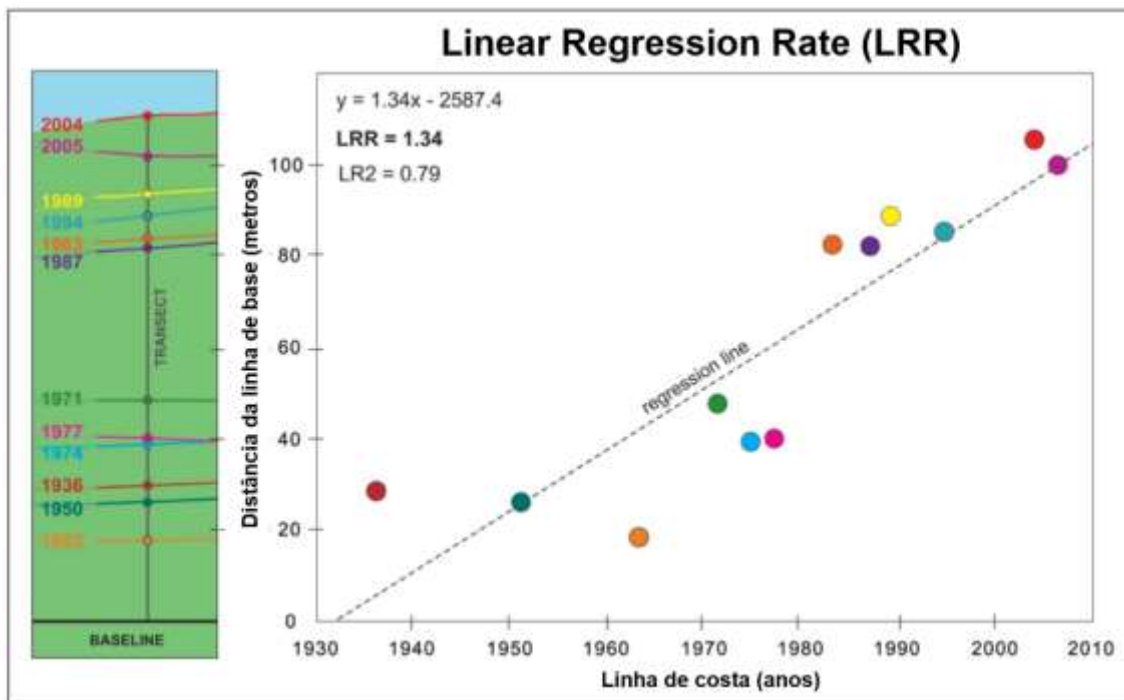
Método	Descrição sucinta	Vantagens	Desvantagens
End Point Race – EPR	Calcula a média anual da distância entre a linha mais antiga e a linha mais recente;	Determina a variação máxima da linha de costa;	Utiliza apenas duas linhas de costa, mascarando os erros;
Linear Regression Rate – LRR	Calcula a variação da linha de costa ao longo do tempo considerando todas as linhas coletadas, sendo expresso em m/ano;	Permite a utilização de todas as linhas de costas coletadas e apresenta as áreas com tendências de erosão ou progradação;	Subestima os potenciais erros referentes as taxas de mudanças da linha de costa;
Shoreline Change Envelope – SCE	Calcula a distância entre a mais antiga e a mais próxima da baseline;	Apresenta apenas valores positivos, impossibilitando a análise referente a erosão ou progradação	Utiliza apenas duas linhas de costa, mascarando os erros;
Net Shoreline Movement – NSM	Calcula a distância líquida entre a linha mais antiga e a linha mais recente;	Determina a instabilidade da praia ao longo do período estudado;	Utiliza apenas duas linhas de costa, mascarando os erros;
Weighted Linear Regression – WLR	Calcula a variação da linha de costa através de uma regressão ponderada	Considera todo o conjunto de dados de linha de costa e contabiliza os possíveis erros.	O cálculo só pode ser realizado a partir de um número de variáveis

Fonte: Ferreira (2019).

Para a obtenção das taxas da linha de costa foram necessários atributos como OBJECTID, SHAPE, SHAPE Length, DATE_ e UNCERTAINTY. Desta forma, 143 foram gerados, cada um abrangendo a extensão do trecho monitorado (1,50 km). Esses transectos são perpendiculares à linha de base e cruzam todas as linhas de preamar máxima extraídas (12) em intervalos de 10 m. A distância de suavização (*smoothing distance*) para cada transecto foi de 1000 m, e a incerteza dos dados foi assumida como 10. Todos os transectos foram lançados ortogonalmente a partir da linha de base ao longo da linha costeira dos meses monitorados.

Os métodos estatísticos adotados para o monitoramento do trecho estudado foram o *Linear Regression Rate* (LRR) e o *Net Shoreline Movement* (NSM). O primeiro parâmetro determina as taxas a partir do ajuste dos mínimos quadrados da linha de regressão para todos os transectos estabelecidos ao longo das linhas de costa (Thieler *et al.*, 2009) (Figura 4). O método de regressão linear inclui os recursos: (1) todos os dados são usados, independentemente das mudanças de tendência ou precisão; (2) o método é puramente computacional; (3) o cálculo é baseado em conceitos estatísticos aceitos na literatura; (4) o método é fácil de empregar (Dolan *et al.*, 1991) e a sua análise, para o referido estudo, foi realizada utilizando dados de linha de costa referente ao período de alta agitação de marítima (ondas *swell*) e nas condições de tempo normais (ondas *sea*).

Figura 4 - Disposição do método estatístico Linear Regression Rate (LRR).

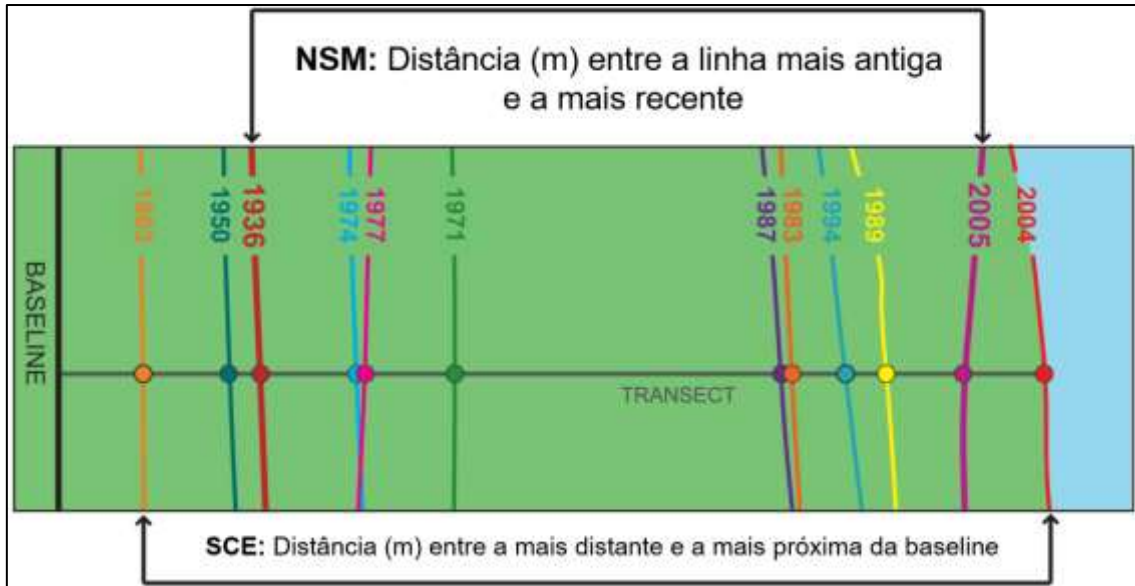


Fonte: Adaptado de Himmelstoss *et al.* (2018).

O *Net Shoreline Movement* (NSM) calcula a distância, em metros, entre a linha de costa mais antiga e a mais recente. Diferente do *Shoreline Change Envelope* (SCE), pois esta calcula a diferença entre a linha mais distante da *baseline* até a mais próxima. Ela vai determinar a instabilidade máxima durante o período analisado. No NSM, os resultados com valores positivos indicam movimentos em direção ao mar, enquanto os valores negativos, indicam movimentos em direção as terras emersas (Thieler *et al.*, 2009). A figura 5 apresenta, em síntese, o procedimento da análise estatística realizada pelo *software* DSAS, onde inclui dados

referentes a *baseline* (linha preta), transecto (cinza) e as diversas linhas de costas para cada ano analisado (linhas multicoloridas).

Figura 5 - Disposição dos métodos Shoreline Change Envelope (SCE) e Net Shoreline Movement (NSM).



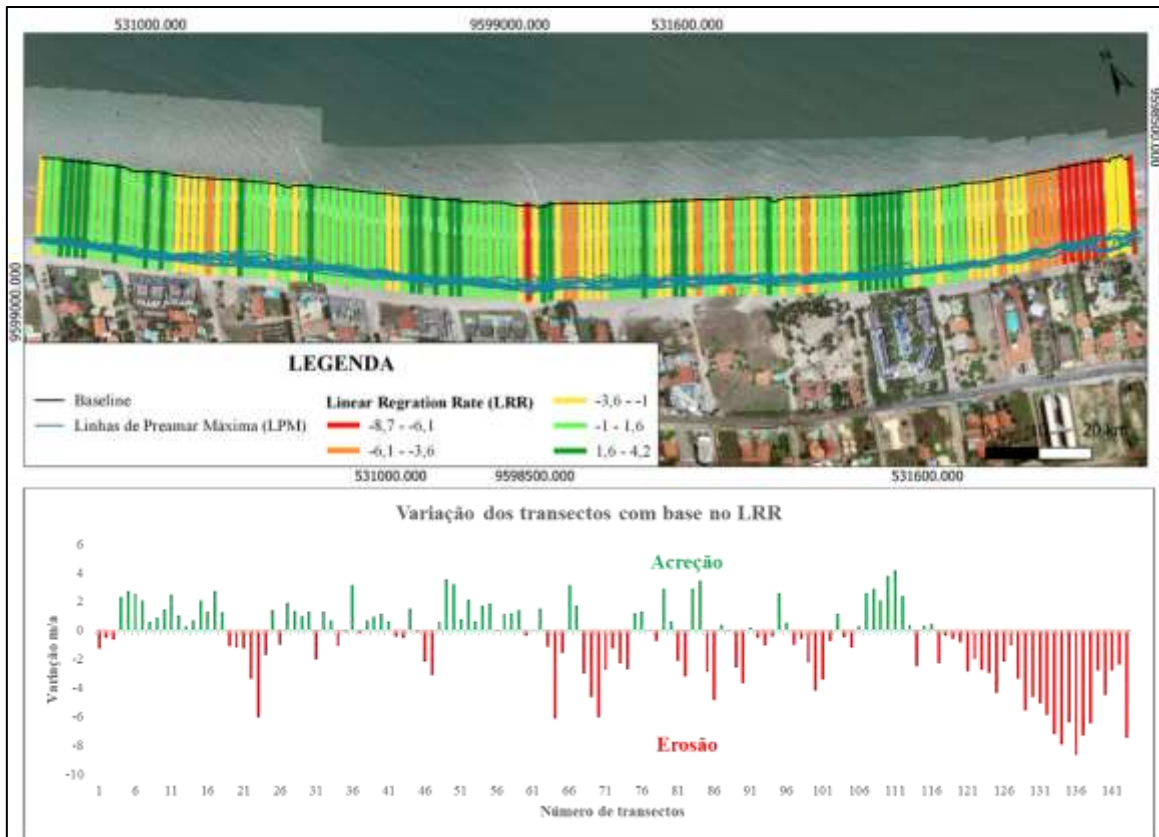
Fonte: Adaptado de Himmelstoss *et al.* (2018).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram traçados 143 transectos pelo DSAS a partir da linha de base (*baseline*) para analisar a dinâmica da LPM. No cálculo da regressão linear simples (LRR), a taxa média de variação da LPM foi de -0,98 m/ano, tendo como resultante, um trecho com leve recuo em direção à frente marinha urbana do Cumbuco no seu limite com a Praia da Tabuba. De uma forma geral, a área monitorada apresentou tendência erosivas mais acentuadas na sua porção leste, enquanto na porção oeste, houve uma tendência progradacional (movimento da LPM em direção ao mar) (Figura 6).

A taxa média dos 78 transectos em erosão foi de -2,98 m/ano. A taxa de variação da LPM mostra uma tendência negativa concentrada ao longo do trecho centro leste, indicando um estado de erosão mais evidente. O recuo máximo calculado pelo DSAS foi de 8,69 m no transecto 136, localizado no extremo leste da área monitorada, limite com o bairro da Tabuba que está sobre erosão severa (Paula *et al.*, 2022; Paula *et al.*, 2021). Isso pode significar que o processo erosivo já materializado em todas as praias a leste do Cumbuco pode estar em sua fase inicial nesse trecho da costa.

Figura 6 - Variação de curto período da Linha de Preamar Máxima do Cumbuco e as taxas LRR

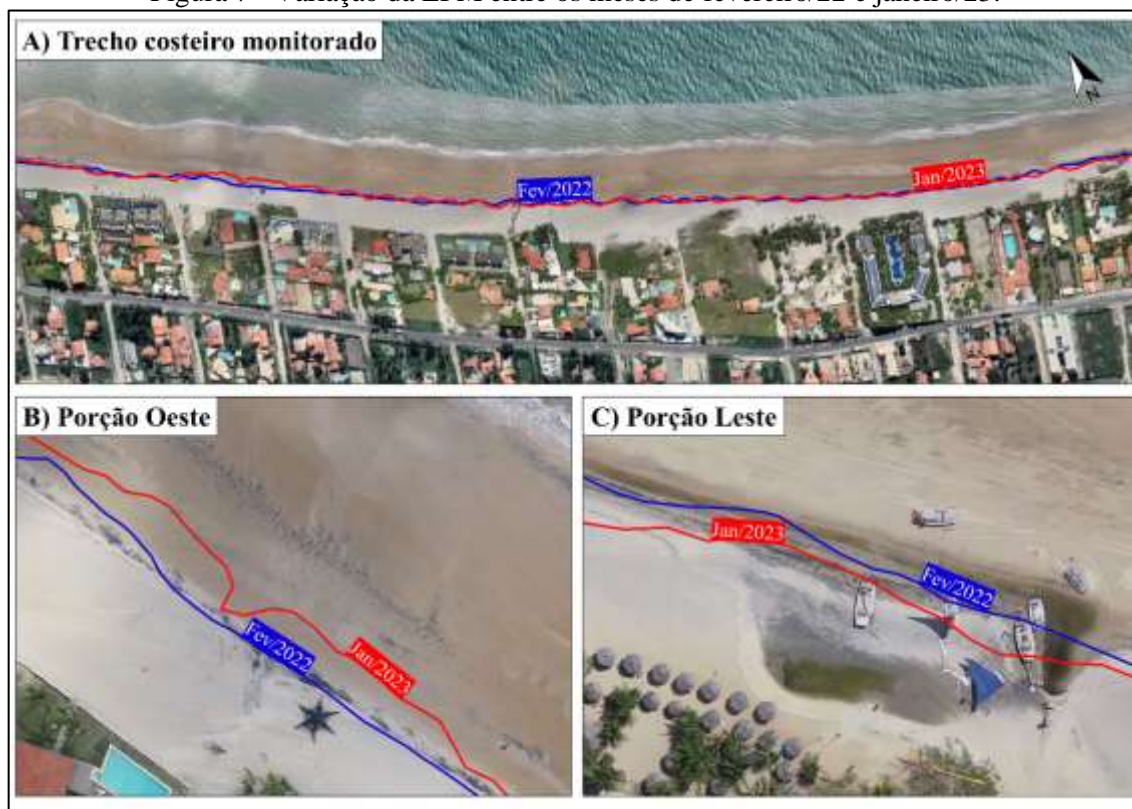


Fonte: Elaborado pelos autores.

Dos demais transectos, foi observado que 65 (45,52%) apresentaram comportamento positivo, ou seja, estão em situação progradação. A taxa média de acreção foi de 1,21 m/ano, com o máximo valor na porção central, registrando 4,15 m no transecto 111. Na porção central há presença de dunas frontais vegetadas. Conforme Hesp *et al.* (2005), as dunas frontais são importantes estruturas verdes de proteção costeira, servindo de anteparo contra ação das ondas. Além disso, em períodos com eventos de ressacas do mar, suas areias podem contribuir para estabilizar o perfil de equilíbrio da praia.

Como já se sabe bem, é unânime entre os especialistas que tratam sobre o comportamento da linha de costa, o quanto essa feição é dinâmica, especialmente quando o critério adotado é a LPM. No trecho monitorado da Praia do Cumbuco, essa máxima não foi diferente, como pode ser observado na Figura 7. Nesse caso, a mobilidade das linhas apresentou comportamento similar ao observado anteriormente, em que há predomínio da situação erosiva na porção leste, enquanto na porção oeste, a situação é oposta, com trechos em progradação.

Figura 7 - Variação da LPM entre os meses de fevereiro/22 e janeiro/23.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A situação erosiva na porção leste pode ter sua explicação pautada em uma associação de fatores locais, sejam eles: o primeiro, pode estar associado com o escoamento das águas da chuva pelas galerias até a faixa de praia, provocando uma erosão logo a sua frente. Trata-se de uma situação concentrada temporalmente na quadra chuvosa (fevereiro-maio). Associado a isso, em um segundo momento, em ciclo de preamar de sizígia, o alcance máximo das ondas é potencializado pelo rebaixamento topográfico da crista da berma pela ação do escoamento pluvial das águas (Figura 8).

Figura 8 – Modificação da fisiografia praial em decorrência da exposição da galeria pluvial em concomitância a atuação das ondas



Fonte: Acervo dos autores.

Em oposição a situação descrita anteriormente, a porção oeste da área experimental é mais estável e apresenta tendências progradacionais. Nesse caso, as rochas de praia, localizadas na parte inferior do perfil da praia, exercem papel preponderante na diminuição da energia das ondas (Bar *et al.*, 2022), contribuindo assim, para manutenção de um perfil mais equilibrado. Esse subsistema também constitui um importante indicador morfológico da praia, pois ora está coberto, ora descoberto pelas areias, indicando aí uma variação vertical do volume das areias da praia (Karkani *et al.*, 2017; Cooper, 2020). Claudino-Sales *et al.* (2022) reforçam a ideia que o aprisionamento de sedimentos pelas rochas de praia contribui para a engorda do ambiente praial.

Outro parâmetro estatístico do DSAS bastante utilizado para compreender o comportamento da LPM é o *Net Shoreline Movement* - NSM (YUM *et al.*, 2023; MUSKANANFOLA, *et al.*, 2020). Trata-se de estatísticas do movimento total entre duas posições da LMP ao longo do tempo. Essa medida de mudança foi aplicada para as linhas de fevereiro de 2022 e janeiro de 2023. Como no caso do LRR, são 143 transectos analisados, sendo que desses, 73 transectos (51%) indicam tendência à erosão. Já os outros 70 transectos (49%) indicam uma situação progradacional. Especialmente, os transectos com tendência erosiva estão distribuídos na porção centro-leste, enquanto os progradacionais na porção centro-oeste, situação similar ao que foi observado com uso do parâmetro LRR. Desse modo, ambos os parâmetros apontam para mesma tendência com a mesma distribuição espacial.

Com relação as taxas, os transectos em erosão apresentaram um valor médio de -2,16 m/ano, com valor máximo observado de -7,35 m/ano. Em oposição, os transectos progradacionais apresentaram uma taxa média de 3,33 m/ano, com valor máximo de 11 m/ano (transecto 30) e média de 3,33m (Figura 9).

Figura 9 - Variação anual da linha de preamar máxima: a) disposição dos transectos ao longo do trecho monitorado; b) gráfico de área demonstrando o comportamento da linha de preamar máxima.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Ferreira (2019) indica que o método NSM, por utilizarem apenas duas linhas de costa ao longo do tempo para computar os dados, não deve ser utilizado para monitoramento de longo prazo, haja vista que determinados eventos (erosivos ou deposicionais) serão mascarados por conta do intervalo de tempo. Desta forma, ao ser utilizado em pesquisas a curto prazo, como no caso desse estudo, o parâmetro pode trazer respostas significativas em decorrência de dados equivalentes a sazonalidade local. Como acima descrito, o movimento líquido da LPM apresentou proporcionalmente uma tendência equilibrada com relação ao número de transectos com tendência erosiva ou progradacional.

O monitoramento de curto prazo, tendo como indicador a LPM, permitiu compreender melhor as flutuações da linha de costa no tempo e no espaço. Nesse caso, é comum estabelecer

limiares e qualificar a dinâmica em categorias, como foi feito por Esteves e Finkl (1998) e Luijendijk *et al* (2018). Nesses estudos, os autores enquadraram a mobilidade da linha de costa em uma classificação que evolui três níveis, sejam eles: erosão, estabilidade e erosão (Tabela 3). Além disso, são estabelecidos níveis ou intervalos. Nesse mesmo sentido, Natajara *et al.* (2021) criaram a seguinte classificação para a ilha de San Martin, em Bangladesh (Tabela 4).

Tabela 3 - Qualificação da situação da linha de costa e classe de taxas com base em Esteves e Finkl (1998) e Luijendijk *et al.* (2018).

Situação da linha de costa	Escala de variação
Acresção	>0,5 m/ano
Estável	-0,5 m/ano a 0,5 m/ano
Erosão	-1,0 m/ano a -0,5 m/ano
Erosão intensa	-3,0 m/ano a -1,0 m/ano
Erosão severa	-5,0 m/ano a -3,0 m/ano
Erosão extrema	<-5,0 m/ano

Fonte: Esteves e Finkl (1998).

Tabela 4 - Qualificação da situação da linha de costa e classe de taxas com base em Natajara *et al.* (2021).

Situação da linha de costa	Escala de variação
Acresção muito elevada	>2 m/ano
Acresção elevada	1 m/ano a 2 m/ano
Acresção moderada	0 m/ano a 1 m/ano
Estabilidade	0 m/ano
Erosão moderada	-1,0 m/ano a 0 m/ano
Erosão intensa	-2,0 m/ano a -1,0 m/ano
Erosão muito intensa	<-2,0 m/ano

Fonte: Natajara *et al.* (2021).

Por fim, considerando as classificações já existentes e os resultados do monitoramento de curto prazo realizado nesse estudo, a Tabela x traz uma proposição de classificação a partir da aplicação do parâmetro LRR em praias arenosas de mesomaré com regime semidiurno.

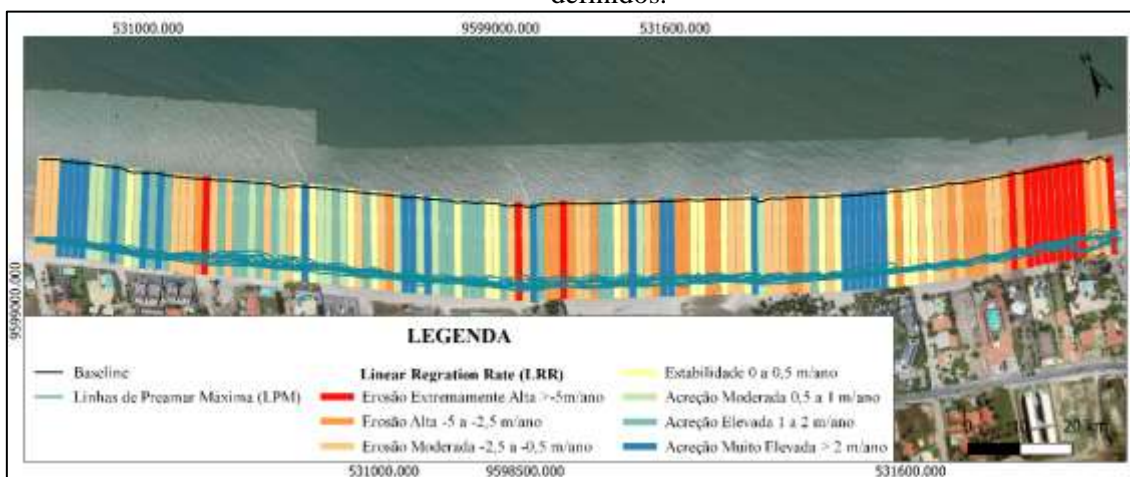
Tabela 4 – Classificação da situação da LPM com base na aplicação do LRR em monitoramentos de curto prazo.

Situação da linha de costa	Escala de variação
Erosão Extremamente Alta	> - 5m/ano
Erosão Alta	-5 a 2,5 m/ano
Erosão Moderada	-2,5 a -0,5 m/ano
Estabilidade	0 a 0,5 m/ano
Acreção Moderada	0,5 a 1 m/ano
Acreção Elevada	1 a 2 m/ano
Acreção Muito Elevada	> 2 m/ano

Fonte: Elaborado pelos autores com base em Natajaran *et al.* (2021) e Esteves e Finkl (1998).

Com base na classificação proposta na tabela 4, a Figura 10 apresenta a variação da LPM ao longo do trecho monitorado. Nota-se, portanto, que a porção extremo leste da localidade indica tendência a erosão extremamente alta a erosão moderada, apresentando pontos com estabilidade e acreção muito elevada.

Figura 10 - Classificação da linha de preamar máxima (LPM) com base nos parâmetros estatísticos definidos.



Fonte: Elaborado pelos autores.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O monitoramento de curto prazo com emprego de técnicas modernas (e.g. GNSS-RTK e imageamento com Drone) permite uma melhor compreensão do dinamismo da linha de costa, especialmente com uso da LPM como indicador morfológico. No entanto, as condições

oceanográficas e hidrometeorológicas devem sempre ser consideradas no balizamento desse tipo de estudo.

O comportamento do indicador LPM ou alcance máximo das marés foi extremamente variável ao longo da faixa de praia, respondendo as condicionantes oceanográficas e a sazonalidade local. Ademais, a sua utilização permitiu o registro mais detalhado da posição da linha de costa para determinar as taxas de erosão, progradação e estabilidade.

O uso do DSAS e dos seus parâmetros estatísticos foi fundamental na compreensão da dinâmica da LPM. Vale destacar que o uso da LPM está descrito na Constituição do Estado do Ceará, Artigo 23, Parágrafo único. A sua utilização está expressamente definida para delimitação de praia. Logo, trata-se de um indicador que será utilizado para definir a faixa livre, com largura mínima de trinta e três metros, ou seja, uma aplicação direta na gestão de ambientes costeiros.

Esse estudo traz uma contribuição direta na compreensão da dinamicidade da linha de costa, permitindo identificar as tendências de erosão, estabilidade e progradação. Nesse sentido, foi proposto no estudo uma classificação da situação da linha de costa com base no parâmetro LRR do DSAS. Desse modo, foram indicadas sete classes e seus respectivos limiares ou intervalos para classificação de praias arenosas subordinadas a mesomarés em regime semidiruno.

Por fim, este estudo mostrou que combinar sensoriamento remoto, com uso de imagens de DRONE, e a tecnologia GIS, com uso do DSAS, pode ser importante para estudos de mudança costeira de curto prazo, como foi o caso aqui aplicado. Assim, os resultados indicam que no trecho monitorado da Praia do Cumbuco já há tendências de erosão. Desse modo, a última praia do município de Caucaia que ainda não tinha sido atingida pela erosão, passa a ter os seus primeiros registros.

REFERÊNCIAS

ALADWANI, N. S. Shoreline change rate dynamics analysis and prediction of future positions using satellite imagery for the southern coast of Kuwait: A case study. **Oceanologia**, [s.l.], v. 64, n. 3, p. 417-432, 2022.

AWAD, M.; EL-SAYED, H. M. The analysis of shoreline change dynamics and future predictions using automated spatial techniques: Case of El-Omayed on the Mediterranean coast of Egypt. **Ocean & Coastal Management**, [s.l.], v. 205, may 2021.

BAR, A. *et al.* Beachrock Morphology along the Mediterranean Coast of Israel: Typological Classification of Erosion Features. **Journal of Marine Science and Engineering**, [s.l.], v. 10, n. 11, 2022.

BARRAGÁN, J. M.; DE ANDRÉS, M. Analysis and trends of the world's coastal cities and agglomerations. **Ocean & Coastal Management**, [s.l.], v. 114, p. 11-20, 2015.

BARROS, E. L. **Erosão costeira no litoral do município de Icapuí-Ce na última década: causas, consequências e perspectivas futuras**. 2018. Tese (Doutorado em Ciências Marinhas Tropicais) – Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

BENGOUFA, S. *et al.* Machine learning and shoreline monitoring using optical satellite images: case study of the Mostaganem shoreline, Algeria. **Journal of applied remote sensing**, [s.l.], v. 15, n. 2, p. 026509-026509, 2021.

CASTELLE, B. *et al.* Spatial and temporal patterns of shoreline change of a 280-km high-energy disrupted sandy coast from 1950 to 2014: SW France. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, [s.l.], v. 200, p. 212-223, 2018.

CLAUDINO-SALES, V. de; MARQUES, E. de S.; PINHEIRO, L. de S. Medida da variação da linha de costa e mudanças morfológicas das praias “Barreiras” e do “Farol” em Camocim, Estado do Ceará, Nordeste do Brasil. **Revista Ciência Geográfica**, Bauru, v. 26, n. 01, p. 289-307, 2022.

COOPER, J. A. G. *et al.* Sandy beaches can survive sea-level rise. **Nature Climate Change**, [s.l.], v. 10, n. 11, p. 993-995, 2020.

DE ANDRÉS, M.; BARRAGÁN, J. M.; SCHERER, M. Urban centres and coastal zone definition: Which area should we manage?. **Land use policy**, [s.l.], v. 71, p. 121-128, 2018.

DEWI, R. S.; BIJKER, W. Dynamics of shoreline changes in the coastal region of Sayung, Indonesia. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science**, [s.l.], v. 23, n. 2, p. 181-193, 2020.

DI PAOLA, G. *et al.* Shoreline Evolution and Erosion Vulnerability Assessment along the Central Adriatic Coast with the Contribution of UAV Beach Monitoring. **Geosciences**, [s.l.], v. 12, n. 10, p. 353, 2022.

DOLAN, R.; FENSTER, M. S.; HOLME, S. J. Temporal analysis of shoreline recession and accretion. **Journal of coastal research**, Charlottesville, v. 7, n. 3, p. 723-744, 1991.

ESMAIL, M.; MAHMOD, W. E.; FATH, H. Assessment and prediction of shoreline change using multi-temporal satellite images and statistics: Case study of Damietta coast, Egypt. **Applied Ocean Research**, [s.l.], v. 82, p. 274-282, 2019.

ESTEVEZ, L. S.; FINKL, C. W. The problem of critically eroded areas (CEA): An evaluation of Florida beaches. **Journal of Coastal Research**, Palm Beach, n. 26, p. 11-18, 1998.

FERREIRA, T. A. B. **Aplicação de sistema de análise de linha de costa (Digital Shoreline Analysis System) para avaliação de mudanças costeiras no delta do Parnaíba**. 2019. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica e Geofísica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

GRIGGS, G. *et al.* Groins, sand retention, and the future of Southern California's beaches. **Shore & Beach**, [s.l.], v. 88, n. 2, p. 14-36, 2020.

GRIGGS, G.; PATSCH, K. California's Coastal Development: Sea-Level Rise and Extreme Events—Where Do We Go from Here. **Shore & Beach**, [s.l.], v. 87, n. 2, p. 15-28, 2019.

HESP, P. A. *et al.* Beach ridges, foredunes or transgressive dunefields? Definitions and an examination of the Torres to Tramandaí barrier system, Southern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, [s.l.], v. 77, n. 3, p. 493-508, 2005.

HIMMELSTOSS, E. A. *et al.* **Digital shoreline analysis system (DSAS) version 5.0 user guide**. [s.l.]: US Geological Survey, 2018.

HOSSAIN, S. A. *et al.* Coastal vulnerability assessment of India's Purba Medinipur-Balasore coastal stretch: A comparative study using empirical models. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, [s.l.], v. 77, p. 103065, 2022.

HOSSEN, M. F.; SULTANA, N. Shoreline change detection using DSAS technique: Case of Saint Martin Island, Bangladesh. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, [s.l.], v. 30, p. 100943, 2023.

KARKANI, A. *et al.* Tracking shoreline evolution in central Cyclades (Greece) using beachrocks. **Marine Geology**, [s.l.], v. 388, p. 25-37, 2017.

KILAR, H. Shoreline change assessment using DSAS technique: A case study on the coast of Meriç Delta (NW Türkiye). **Regional Studies in Marine Science**, [s.l.], v. 57, p. 102737, 2023.

LÄMMLE, L. *et al.* Anthropogenic Pressure on Hydrographic Basin and Coastal Erosion in the Delta of Paraíba do Sul River, Southeast Brazil. **Journal of Marine Science and Engineering**, [s.l.], v. 10, n. 11, p. 1585, 2022.

LIMA, J. C. **Erosão costeira e seus efeitos no potencial recreacional das praias do litoral de Caucaia (Ceará, Brasil): problemas e consequências no desenvolvimento do turismo**. 2021. Dissertação (Mestrado Acadêmico em Geografia) – Programa de Pós-graduação em Geografia, Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2021. Disponível em: <http://siduece.uece.br/siduece/trabalhoAcademicoPublico.jsf?id=102414>. Acesso em: 01 jul. 2023.

LUIJENDIJK, A. *et al.* The state of the world's beaches. **Scientific reports**, [s.l.], v. 8, n. 1, p. 1-11, 2018.

MARTÍNEZ, M. L. *et al.* Shoreline dynamics and coastal dune stabilization in response to changes in infrastructure and climate. **Journal of Coastal Research**, [s.l.], v. 92, n. SI, p. 6-12, 2019.

MCALLISTER, E. *et al.* Multispectral satellite imagery and machine learning for the extraction of shoreline indicators. **Coastal Engineering**, [s.l.], p. 1-24, 2022.

MEIRELES, A. J. de A. Falésias. **Geomorfologia costeira: funções ambientais e sociais**. Fortaleza: Edições UFC, 2014.

MORAIS, J. O. Aspectos do transporte de sedimentos no litoral do município de Fortaleza, estado do Ceará, Brasil. **Arq Ciênc Mar**, Fortaleza, v. 20, n. 1-2, p. 71-100, 1980.

MORAIS, J. O. *et al.* Ceará. In: MUEHE, D. (org.). **Erosão e progradação do litoral brasileiro**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2006. p. 131-154.

MORAIS, J. O. *et al.* Ceará, In: MUEHE, D. (org.), **Panorama da Erosão Costeira no Brasil**. Rio de Janeiro: Editora do MMA, 2018. p. 261-287.

MORAIS, J. O. Processos e impactos ambientais em zonas costeiras. **Revista de Geologia**, Fortaleza, v. 9, p. 191-242, 1996.

MUSKANANFOLA, M. R.; FEBRIANTO, S. Spatio-temporal analysis of shoreline change along the coast of Sayung Demak, Indonesia using Digital Shoreline Analysis System. **Regional Studies in Marine Science**, [s.l.], v. 34, p. 101060, 2020.

NASSAR, K. *et al.* Shoreline change detection using DSAS technique: Case of North Sinai coast, Egypt. **Marine Georesources & Geotechnology**, [s.l.], v. 37, n. 1, p. 81-95, 2019.

NATARAJAN, L. *et al.* Shoreline changes over last five decades and predictions for 2030 and 2040: a case study from Cuddalore, southeast coast of India. **Earth Science Informatics**, [s.l.], v. 14, p. 1315-1325, 2021.

PAJAK, M. J.; LEATHERMAN, S. P. The high water line as shoreline indicator. **Journal of Coastal Research**, West Palm Beach, v. 18, n. 2, p. 329–337, 2002.

PAULA, D. P. de *et al.* Coastal erosion and tourism: the case of the distribution of tourist accommodations and their daily rates. **Geography, Environment, Sustainability**, [s.l.], v. 14, n. 3, p. 110-120, 2021.

PAULA, D. P. de; VASCONCELOS, Y. G.; DE SOUSA, F. R. C. Effects of beach width variability on recreational function: A case study of NE Brazil. **Regional Studies in Marine Science**, [s.l.], v. 51, n. 4, p. 102182, 2022.

PETRIȘOR, A.I. *et al.* Degradation of coastlines under the pressure of urbanization and tourism: Evidence on the change of land systems from Europe, Asia and Africa. **Land**, [s.l.], v. 9, n. 8, p. 1-43, 2020.

SAM, S. C.; GURUGNANAM, B. Coastal transgression and regression from 1980 to 2020 and shoreline forecasting for 2030 and 2040, using DSAS along the southern coastal tip of Peninsular India. **Geodesy and Geodynamics**, [s.l.], v. 13, n. 6, p. 585-594, 2022.

SCHWEITZER, A. **Monitoramento da linha de costa: uma análise de métodos e indicadores aplicados em investigações na escala de eventos**. 2013. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/122795/324007.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 14 mar. 2023.

SILVA, M. T. da. **Dinâmica da linha de costa do Estado do Ceará, Brasil**. 2022. Tese (Doutorado em Geologia) - Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

SIYAL, A. A. *et al.* Shoreline change assessment of Indus delta using GIS-DSAS and satellite data. **Regional Studies in Marine Science**, [s.l.], v. 53, p. 102405, 2022.

SOUZA, M. D. *et al.* **Diagnóstico Geoambiental do Município de Fortaleza**: Subsídios ao Macrozoneamento Ambiental e à Revisão do Plano Diretor Participativo – PDPPFor. 1. ed. Fortaleza: Prefeitura Municipal de Fortaleza, 2009.

SPLINTER, K. D.; HARLEY, M. D.; TURNER, I. L. Remote sensing is changing our view of the coast: Insights from 40 years of monitoring at Narrabeen-Collaroy, Australia. **Remote Sensing**, [s.l.], v. 10, n. 11, p. 1-25, 2018.

THIELER, E. R. *et al.* The Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0-an ArcGIS extension for calculating shoreline change. **US Geological Survey**, [s.l.], 2009.

TOURE, S. *et al.* Shoreline detection using optical remote sensing: A review. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, [s.l.], v. 8, n. 2, p. 75, 2019.

VAN DER WERFF, H. M. A. Mapping shoreline indicators on a sandy beach with supervised edge detection of soil moisture differences. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, [s.l.], v. 74, p. 231-238, 2019.

YUM, S. G. *et al.* A quantitative analysis of multi-decadal shoreline changes along the East Coast of South Korea. **Science of The Total Environment**, [s.l.], v. 876, p. 162756, 2023.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da UECE pelo apoio. A Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico - FUNCAP pela bolsa de mestrado. Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela Bolsa PQ (309102/2022-7) e a Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo financiamento dos projetos (FCT AAC No. 02 / SAICT / 2017 e PS1-00186-00333.01.00/21). Aos amigos pelo apoio, em especial, ao Jaílson Lima pelas discussões e auxílio.