



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO – UFMA
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE –
CCBS DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFIA E
LIMNOLOGIA – DEOLI CURSO DE OCEANOGRAFIA**

LUDMILLA VITÓRIA CARVALHO RABELO

**Ciência Cidadã e Monitoramento Costeiro: Implementação do Projeto
CoastSnap em Ambiente Macromaré, Praia da Ponta da Areia, São Luís,
Maranhão**

**São Luís - MA
2026**

LUDMILLA VITÓRIA CARVALHO RABELO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Oceanografia da Universidade Federal do Maranhão para obtenção do grau de bacharelado em Oceanografia.

Orientador(a): Prof. Dr. Leonardo Gonçalves de Lima.

**São Luís- MA
2026**

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Carvalho Rabelo, Ludmilla Vitória.

Ciência Cidadã e Monitoramento Costeiro: Implementação do Projeto CoastSnap em Ambiente Macromaré, Praia da Ponta da Areia, São Luís, Maranhão / Ludmilla Vitória Carvalho Rabelo. - 2026.

71 p.

Orientador(a): Leonardo Gonçalves de Lima.

Curso de Oceanografia, Universidade Federal do Maranhão, São Luís - Ma, 2026.

1. Coastsnap. 2. Ciência Cidadã Costeira. 3. Morfodinâmica Praial. 4. Validação Metodológica. 5. Macromaré. I. de Lima, Leonardo Gonçalves. II. Título.

**Ciência Cidadã e Monitoramento Costeiro: Implementação do Projeto CoastSnap em
Ambiente Macromaré, Praia da Ponta da Areia, São Luís, Maranhão**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao curso de
Oceanografia da Universidade
Federal do Maranhão para obtenção
do grau de bacharel em
Oceanografia.

APROVADO EM: 15/07/2026

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Leonardo Gonçalves de Lima (Orientador)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO - UFMA

Prof. Dr. Claudia Klose Parise (Titular)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO - UFMA

Prof. Dr. Denilson da Silva Bezerra (Titular)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO - UFMA

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço aos meus pais, Hélia e Augusto, por acreditarem em mim, e pela abdicação de suas vidas de intenso trabalho, para que eu pudesse continuar a trilhar meu caminho. À minha família, dedico esta conquista com eterna gratidão.

Aos meus irmãos, Ana e Pedro agradeço pela parceria, pelo carinho e por estarem ao meu lado em cada passo dessa caminhada.

Ao meu namorado Leonardo, que esteve ao meu lado em cada passo dessa trajetória. Obrigada por todo o apoio, pela paciência nos dias difíceis e por tornar esta caminhada muito mais leve e feliz.

Ao Prof. Dr. Leonardo Gonçalves de Lima, agradeço pela orientação, pela disponibilidade e pelo suporte teórico e prático fundamentais para a concretização desta etapa.

Aos meus amigos de laboratório Matheus, Rivaldo, Djulia e Antonio , meu muito obrigada pela parceria, ajudas e pelo ambiente de trabalho que construímos juntos.

À minha amiga Natali, que esteve comigo compartilhando momentos e situações marcantes durante a nossa graduação. Obrigada, minha amiga, pelo companheirismo e apoio em todas as horas. Ter a sua amizade foi um verdadeiro presente dessa graduação .

À minha amiga Beatriz, muito obrigada por estar sempre presente. Sua amizade e apoio fizeram toda a diferença no meu percurso.

Agradeço ao Departamento de Oceanografia e Limnologia e ao Laboratório de Estudos em Oceanografia Geológica pelas oportunidades de experiência e aprendizado.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS	29
2.1 Objetivo Geral	29
2.2 Objetivos Específicos	29
3. REFERENCIAL TEÓRICO	15
3.1 Morfodinâmica Costeira	15
3.2 Impactos de Obras de Engenharia	18
3.3 Caracterização Sedimentológica	20
3.4 Geotecnologias para Monitoramento Costeiro	25
4. MATERIAL E MÉTODOS	30
4.1 Área de Estudo	30
4.2 CoastSnap	31
4.3 Amostragem Sedimentológica	33
4.4 Análise Granulométrica	34
4.5 Levantamento Topográfico (Drone + GNSS RTK)	36
5. RESULTADOS	39
5.1 Caracterização Morfodinâmica	39
5.2 Perfil Topográfico	41
5.3 Granulometria	43
5.4 Monitoramento da Linha de Costa	46
5.5 CoastSnap-MA e Ciência Cidadã	52
5.6 Aspectos Morfológicos e Interferências Antrópicas	56
6. DISCUSSÃO	59
6.1 Morfodinâmica da Praia	59

6.2 Caracterização Sedimentológica	60
6.3 Acurácia do CoastSnap	61
6.4 Ciência Cidadã e Engajamento Social	62
6.5 Interferências Antrópicas	63
7. CONCLUSÃO	64
8. REFERÊNCIAS	65

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação da setorização da morfodinâmica praial com base na variação da maré	16
Figura 2 – Visão aérea oblíqua da orla da Ponta d'Areia em baixa-mar, evidenciando a evolução do Espigão Costeiro	20
Figura 3 – Estação CoastSnap-MA na Praia da Ponta d'Areia e instruções de uso do totem	26
Figura 4 – Interface do perfil oficial do projeto CoastSnap-MA no Instagram	28
Figura 5 – Mapa de localização da estação CoastSnap da Praia da Ponta d'Areia – MA	30
Figura 6 – Coleta de pontos de controle fixos (GCPs) com equipamento GNSS	32
Figura 7 – Amostragem manual de sedimentos superficiais	34
Figura 8 – Etapa de análise granulométrica por difração a laser	35
Figura 9 – Instrumentação de campo para monitoramento costeiro (Drone e GNSS)	36
Figura 10 – Planejamento da grade de voo fotogramétrico automatizado	38
Figura 11 – Ortomosaico com a delimitação do perfil transversal e zoneamento ambiental.....	39
Figura 12 – Perfil topográfico bruto extraído diretamente da nuvem de pontos do Modelo Digital de Superfície (MDS)	40
Figura 13 – Perfil topográfico suavizado da Praia da Ponta d'Areia	41
Figura 14 – Diagrama ternário de classificação textural (Argila–Silte–Areia) adaptado segundo Shepard (1954)	43
Figura 15 – Curvas de frequência granulométrica acumulada em escala Phi para as amostras superficiais	45
Figura 16 – Interface de retificação da imagem registrada às 08h20	46
Figura 17 – Interface de retificação da imagem registrada às 09h00	47

Figura 18 – Interface de retificação da imagem registrada às 10h20	48
Figura 19 – Comparativo entre imagem retificada e ortomosaico gerado no Agisoft Metashape	50
Figura 20 – Série temporal do número mensal de imagens coletadas pelo projeto CoastSnap	52
Figura 21 – Alcance de novos públicos no Instagram do projeto CoastSnap-MA	53
Figura 22 – Engajamento das publicações no Instagram do projeto CoastSnap-MA	54
Figura 23 – Evolução das visualizações das publicações no Instagram do projeto CoastSnap	55
Figura 24 – Afloramento de água por percolação subsuperficial na Ponta d'Areia	56
Figura 25 – Imageamento vertical por drone evidenciando a distribuição espacial dos resíduos sólidos	58

LISTA DE TABELA

Tabela 1 – Recorte da escala granulométrica integrada de Wentworth (1922) e Krumbein (1934) com foco na fração areia.	18
Tabela 2 – Classes representativas do Grau de Seleção Segundo Folk (1968)	19
Tabela 3 – Classes centrais de Assimetria segundo Folk (1968)	20
Tabela 4 – Classes de Curtose segundo Folk (1968)	21
Tabela 5: Parâmetros estatísticos granulométricos descritos em Folk & Ward (1957) das amostras de sedimentos superficiais (P1 a P10) coletadas na área de dunas vegetadas da Praia da Ponta d'Areia	39
Tabela 6: Composição granulométrica percentual das frações de sedimentos superficiais na área de estudo	40
Tabela 7: Número de imagens coletadas por praia e turno (dia/noite)	46
Tabela 8. Distribuição de participantes por estado (Brasil)	47

Resumo

Este estudo apresenta a validação da metodologia de ciência cidadã *CoastSnap* aplicada em ambiente de macromaré, por meio de um trabalho de campo integrado na Praia da Ponta d'Areia, em São Luís, Maranhão. A pesquisa consistiu na avaliação da precisão e aplicabilidade do sistema através da realização simultânea de registros fotográficos no totem *CoastSnap*, processamento digital de imagens, levantamento topográfico, caracterização granulométrica da face de praia e extração de dados sociais do projeto. Para a validação altimétrica e calibração geométrica das imagens processadas, foi realizado um imageamento aéreo por Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) via técnica *Structure-from-Motion* (SfM) ao longo de um transecto contínuo de 340 metros, com amarração em alvos de controle em terra. Os dados topográficos de referência revelaram um perfil tipicamente dissipativo com uma ampla rampa praial na baixa-mar de sizígia, além de um arranjo sinusoidal complexo na retaguarda do estirâncio com três cristas de empilhamento sedimentar proeminentes (2,6 m, 3,7 m e 2,9 m) induzidas pela zona de barlavento do Espigão Costeiro. A caracterização sedimentológica de dez amostras superficiais indicou o domínio absoluto da fração areia (>95%) e uma marcante homogeneidade textural classificada uniformemente como Areia Fina bem selecionada, com exceção da depressão úmida na coleta do P4 (seleção moderada e 4,763% de silte). Os resultados do processamento das imagens obtidas no totem demonstraram alta fidelidade geométrica quando comparados aos dados físicos de campo, comprovando a eficácia e as limitações do *CoastSnap* para o monitoramento de praias dinâmicas sob regimes de macromaré através da integração entre engajamento social e calibração técnica.

Palavras-chave: *CoastSnap*. Ciência Cidadã Costeira. Morfodinâmica Praial. Validação Metodológica. Macromaré. Perfil Topográfico. Granulometria.

Abstract

This study presents the validation of the *CoastSnap* citizen science methodology applied to a macro-tidal environment through an integrated fieldwork campaign at Ponta d'Areia Beach, São Luís, Maranhão, Brazil. The research evaluated the accuracy and applicability of the system by simultaneously conducting photographic records at the CoastSnap cradle, digital image processing, a topographic survey, beach face granulometric characterization, and the extraction of the project's social data. For altimetric validation and geometric calibration of the processed images, an aerial survey using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) via the Structure-from-Motion (SfM) technique was conducted along a continuous 340-meter cross-shore transect, anchored by ground control points. The reference topographic data revealed a typically dissipative profile with a wide sandy ramp exposed during spring low tide, alongside a complex sinusoidal arrangement in the upper beach with three prominent sediment accumulation crests (2.6 m, 3.7 m, and 2.9 m) induced by the windward (*barlavento*) side of the Coastal Groin. Sedimentological characterization of ten surface samples indicated an absolute dominance of the sand fraction (>95%) and a remarkable textural homogeneity uniformly classified as well-sorted Fine Sand, except for the humid depression at station P4 (moderate sorting and 4.763% silt content). The image processing results obtained from the cradle demonstrated high geometric fidelity when compared to the physical field data, proving the effectiveness and limitations of *CoastSnap* for monitoring dynamic beaches under macro-tidal regimes through the integration of social engagement and technical calibration.

Keywords: *CoastSnap*. Coastal Citizen Science. Methodological Validation. Beach Morphodynamics. Macro-tidal. Topographic Profile. Granulometry.

1. INTRODUÇÃO

As zonas costeiras configuram-se como sistemas de elevada complexidade e dinamismo espacial, onde a contínua interação entre processos oceanográficos, meteorológicos e sedimentares modela a morfologia litorânea em escalas temporais que variam de eventos instantâneos a flutuações milenares. No âmago desta dinâmica, a morfodinâmica praial manifesta-se através de mecanismos de retroalimentação entre a hidrodinâmica das ondas, as correntes e os balanços sedimentares locais (SHORT, 1999; MASSELINK; HUGHES, 2014; LIMA et al., 2024). Adquirindo contornos de extrema estabilidade em regiões governadas por regimes de macromaré (com alturas superiores a 6,5m), como verificado no litoral do estado do Maranhão. Neste cenário macromares, as expressivas oscilações diárias do nível d'água alteram ciclicamente o posicionamento horizontal da linha de costa, reconfigurando a distribuição da energia hidrodinâmica ao longo do perfil praial. Diante dessa variabilidade natural, torna-se imperativo o estabelecimento de programas de monitoramento sistemático, sobretudo em praias marcadas por uma intensa pressão antrópica e múltiplos usos sociais.

Neste panorama, a Praia da Ponta d'Areia, localizada no município de São Luís (MA), desponta como um laboratório estratégico para a investigação da dinâmica costeira sob forte pressão antropogênica. A implantação de uma estrutura rígida de engenharia o Espigão Costeiro da Ponta d'Areia, concebida para mitigar a erosão costeira, alterou substancialmente os vetores de transporte sedimentar e reconfigurou a geometria tridimensional do perfil praial (Lima et al., 2022). Esta sensibilidade morfológica atinge o seu ápice durante os alinhamentos astronômicos de sizígia, períodos em que as amplitudes de maré alcançam os seus limites máximos e mínimos impõem respostas geomorfológicas aceleradas e de curta duração (WRIGHT; SHORT, 1984; LIMA et al., 2022).

Historicamente, a documentação e a caracterização dessas respostas rápidas do relevo praial fundamentaram-se em abordagens observacionais sistemáticas. Wright e Short (1984) demonstraram pioneiramente como a combinação de fatores hidrodinâmicos e sedimentares define os estados morfodinâmicos praias através do parâmetro ω . Posteriormente, foram Lippmann e Holman (1989, 1991) que comprovaram que a utilização de registros fotográficos contínuos viabiliza a identificação minuciosa de padrões de arrebatamento, migração de barras arenosas, desenvolvimento de calhas de maré e mutações na declividade do perfil emerso. Esse monitoramento visual sistemático provou ser indispensável para a consolidação dos modelos clássicos de estados de praia, ratificando a eficácia do imageamento ótico como uma ferramenta de alta resolução para decifrar a evolução morfodinâmica de curto prazo.

Sob essa perspectiva metodológica, os sistemas de monitoramento baseados em sensoriamento remoto óptico e de base comunitária, a exemplo do projeto global *CoastSnap*, têm emergido como alternativas eficientes, economicamente viáveis e de elevada frequência temporal para o acompanhamento sistemático de linhas de costa. O método fundamenta-se na captura padronizada de fotografias oblíquas a partir de suportes fixos, permitindo mapear com precisão as flutuações da interface terra-mar ao mesmo tempo em que promove o engajamento social através dos preceitos da ciência cidadã (HARLEY et al., 2019). Todavia, embora a robustez dessa tecnologia esteja amplamente consolidada em escalas internacionais, constata-se uma pronunciada escassez de investigações voltadas para a sua aplicação em praias sob regimes macro-tidais no território brasileiro, com especial carência de dados em ambientes tropicais condicionados por severas modificações de engenharia.

Essa lacuna científica ganha relevância face às peculiaridades do litoral maranhense, cuja marcante macromaré, associada a uma vigorosa circulação estuarina e a intervenções antrópicas rígidas, engendra uma faixa litorânea suscetível a desequilíbrios sedimentares severos (LIMA et al., 2022, 2024). A Praia da Ponta d'Areia sintetiza essa complexidade morfossedimentar, exibindo um histórico marcado por setores alternados de erosão crônica e deposição forçada, processos que condicionam diretamente a distribuição textural dos sedimentos siliciclásticos ao longo da Ilha do Maranhão.

Paralelamente, os avanços geotecnológicos contemporâneos expandiram as fronteiras da monitorização costeira, integrando sensores geodésicos de alta precisão, algoritmos fotogramétricos suborbitais e estratégias participativas. A modelação digital de elevação baseada em dados RTK-GNSS e aerofotogrametria por Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTS/drones) têm permitido reconstruir geometricamente a face praial com acurácia centimétrica, mesmo sob condições de alta energia hidrodinâmica (BRODIE et al., 2019). Esta convergência metodológica é altamente profícua para correlacionar a hidrodinâmica das marés com as mudanças volumétricas do perfil praial, provendo o suporte georreferenciado necessário para calibrar e validar as linhas de costa extraídas via métodos óticos participativos, como o *CoastSnap*, reduzindo as incertezas inerentes aos processos observacionais de curta duração (LINS, 2023).

No âmbito sedimentológico, a caracterização granulométrica assume um papel basilar na elucidação desses processos operantes, visto que propriedades físicas como o diâmetro médio, o grau de seleção e a assimetria das populações de grãos determinam a competência e os limiares de transporte, deposição e retrabalhamento sedimentar (SUGUIO, 2003). Nos ambientes governados por macromarés, os ritmos semidiurnos de subida e descida da lâmina d'água impõem uma redistribuição contínua do material arenoso, gerando assinaturas texturais muito específicas ao longo do perfil transversal da praia (MUEHE, 2004; LIMA et al., 2022). Por conseguinte, a integração indissociável entre os atributos morfológicos e os parâmetros sedimentológicos torna-se crucial para compreender as respostas do estirâncio perante as forças oceanográficas, conferindo robustez científica à análise evolutiva do litoral maranhense.

Diante do exposto, o presente trabalho objetiva avaliar a resposta morfodinâmica da Praia da Ponta d'Areia ao longo de um ciclo diário de maré de sizígia. Para isso, adota uma abordagem integrada que correlaciona registros fotográficos da estação *CoastSnap*, levantamentos topográficos na faixa entremarés, análises granulométricas e a mensuração do engajamento público. Pretende-se decifrar as flutuações da linha de costa e os rearranjos morfológicos induzidos pela máxima amplitude astronômica, testando a aplicabilidade e limitações do *CoastSnap*. A convergência entre observação direta, processamento digital de imagens e indicadores sociais permitirá compreender o comportamento do ecossistema e consolidar sua interface com a sociedade.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Morfodinâmica Costeira em Regimes de Macromarés

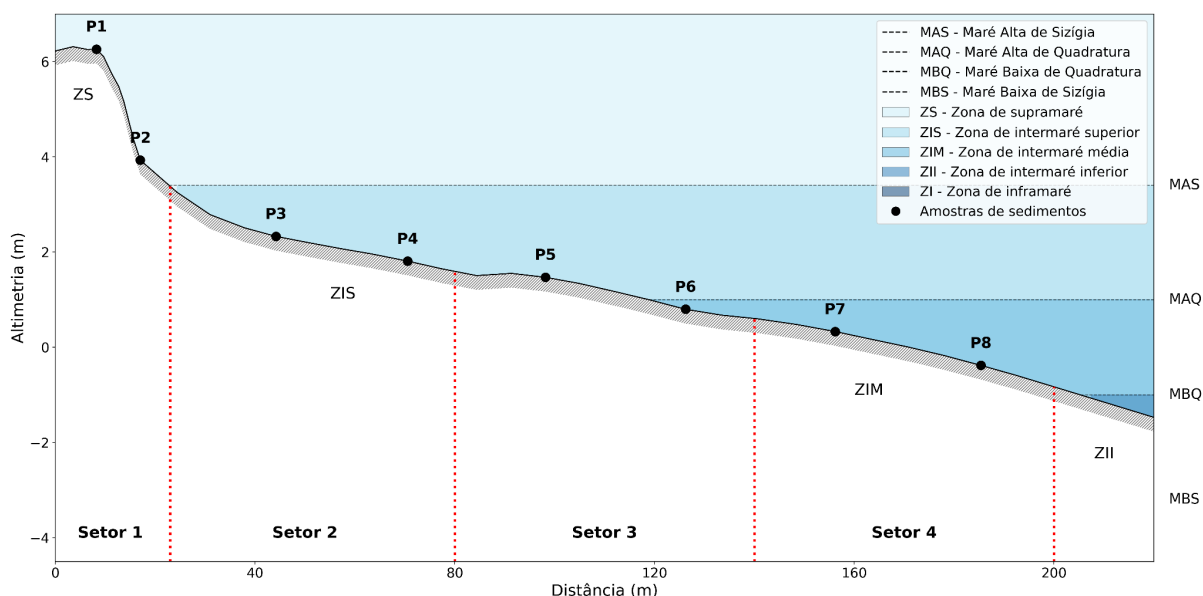
As praias arenosas constituem sistemas geológicos altamente dinâmicos e suscetíveis a constantes modificações, desempenhando um papel fundamental como primeira linha de defesa do continente frente à energia mecânica proveniente dos oceanos. A morfodinâmica praial pode ser definida como o estudo das interações e dos mecanismos de retroalimentação entre a morfologia tridimensional da praia e os processos hidrodinâmicos associados, incluindo a ação das ondas, das correntes litorâneas e das marés (SHORT, 1999). Essas interações controlam o balanço sedimentar local e condicionam respostas morfológicas contínuas, que podem variar desde situações de equilíbrio e deposição sedimentar até cenários de intensa erosão, caracterizados por elevada variabilidade temporal (MUEHE, 2006).

Historicamente, as classificações e os modelos conceituais clássicos de estágios morfodinâmicos, como os estágios refletivo, intermediário e dissipativo propostos por Wright e Short (1984), foram formulados tendo como base faixas litorâneas dominadas por regimes de micromarés (amplitudes de maré inferiores a 2 metros). Contudo, quando esses princípios são transpostos para ambientes de macromaré (onde as amplitudes de maré superam o limiar de 4 metros), os processos físicos atuantes sofrem modificações significativas. Em praias de macromaré, o papel modelador exercido pelas ondas passa a ser compartilhado de forma ativa com a variação rítmica do nível d'água e com a atuação de fortes correntes de maré (MASSELINK; SHORT, 1993).

Os compartimentos morfológicos da Praia da Ponta d'Areia foram classificados com base na proposta de Wright et al. (1982) e Masselink e Short (1993), sendo divididos em zonas de supramaré, intermaré e inframaré. O setor mais interno da praia é caracterizado pela presença de um campo de dunas, que delimita o início da faixa arenosa. A zona de supramaré corresponde à porção da praia que permanece fora da influência direta das marés ordinárias, estendendo-se, em geral, da duna frontal até o limite superior de alcance das vagas de tempestade e deposição de resíduos marinhos (MUEHE, 1996; SUGUIO, 2003).

A compartimentação transversal do perfil praial em zonas funcionais constitui uma abordagem clássica na geomorfologia costeira para compreender a distribuição dos sedimentos e a ação das forças hidrodinâmicas. Fundamentada nos modelos conceituais de dinâmica praial em regimes de maré de Wright e Short (1984) e Masselink e Short (1993), e posteriormente adaptada para a costa brasileira por Muehe (1996), essa setorização toma como referência as variações dos níveis d'água durante os ciclos de sizígia e quadratura. Em praias sob regime de macromaré, o amplo deslocamento horizontal da lâmina d'água divide o estirâncio em subzonas distintas (Intermaré Superior, Média e Inferior), delimitadas pelas marcas de maré alta e baixa de sizígia (MAS e MBS) e de quadratura (MAQ e MBQ). Com base nessa fundamentação teórica, Ramos (2026) representou a setorização morfodinâmica aplicada especificamente ao perfil transversal das praias do Maranhão (Figura 1), estabelecendo a correlação direta entre os níveis de maré, a distribuição dos pontos de amostragem sedimentar e as zonas morfodinâmicas resultantes.

Figura 1: Representação da setorização da morfodinâmica praial com base na variação da maré do litoral maranhense.



Fonte: RAMOS, 2026.

A zona de intermaré é subdividida de acordo com os diferentes níveis de maré. Entre os níveis de maré alta de sizígia (MAS) e maré alta de quadratura (MAQ) situa-se a zona de intermaré superior (ZIS). Abaixo da MAQ e até a maré baixa de quadratura (MBQ) encontra-se a zona de intermaré média (ZIM). Entre a MBQ e a maré baixa de sizígia (MBS) localiza-se a zona de intermaré inferior (ZII). Por fim, a zona de inframaré (ZI) corresponde à área situada abaixo do nível da maré baixa de sizígia, permanecendo permanentemente submersa (MASSELINK; SHORT, 1993; MUEHE, 1996; RAMOS, 2026).

A principal assinatura física de uma praia sob regime de macromarés é o deslocamento horizontal acelerado da zona de quebra das ondas ao longo de um único ciclo semidiurno de maré. Como a lâmina d'água sobe e desce vários metros em um curto intervalo de tempo (aproximadamente seis horas), a energia das ondas não permanece concentrada em uma única coordenada geográfica da face praial, mas sim distribuída de maneira homogênea ao longo de um largo estirâncio (faixa entremarés). Esse fenômeno impede que o perfil atinja os estágios intermediários clássicos, resultando, na maioria das vezes, em praias com morfologias planas, de declividade extremamente suave e compostas por areias finas a muito finas, conhecidas como praias dissipativas de macromaré (MASSELINK; TURNER, 1999).

No cenário da costa norte brasileira, o litoral do estado do Maranhão se destaca por apresentar condições hidrodinâmicas extremas, governadas pela configuração fisiográfica do Golfão Maranhense. O Golfão atua como uma bacia estuarina de macroescala que afunila as águas do Atlântico Sul, alcançando amplitudes de marés semidiurnas que ultrapassam rotineiramente os 6,5 metros de variação vertical durante os períodos de alinhamento astronômico de sizígia (EL-ROBRINI et al., 2006). Esta oscilação impulsiona correntes de maré bidirecionais (fluxos de enchente e vazante) de altíssima velocidade e competência hidráulica, capazes de erodir, transportar e reorganizar extensos volumes de sedimentos siliciclásticos em escalas horárias (SILVA, 2012).

Consequentemente, as praias arenosas situadas na Ilha do Maranhão, como a Praia da Ponta d'Areia, exibem um comportamento morfo-sedimentar pulsante e complexo. Conforme discutido por Meneses (2021), a dinâmica entremarés nesses setores impõe um estresse de cisalhamento contínuo sobre o leito praial, forçando um rearranjo morfológico acelerado no qual a distribuição geométrica do perfil e a textura dos sedimentos respondem imediatamente aos pulsos energéticos da maré de sizígia. Entender as taxas de variação espacial e temporal desse ambiente constitui um pré-requisito crítico para validar novas metodologias de monitoramento ótico e para fundamentar planos eficientes de engenharia e gestão ambiental costeira (MENESES, 2021; SANTOS, 2024).

2.2 Impactos de Obras Rígidas de Engenharia na Dinâmica Sedimentar

Os espigões costeiros são estruturas lineares construídas perpendicularmente à linha de costa, projetados com a finalidade primária de interceptar a deriva litorânea e aprisionar os sedimentos transportados, promovendo o alargamento artificial da faixa de areia a montante (MUEHE, 2006). Embora alcancem eficácia local na retenção sedimentar do setor protegido, essas obras introduzem uma severa assimetria na dinâmica costeira regional. Ao bloquear a passagem da areia, o espigão gera um padrão clássico de acumulação e progradação da linha de costa no lado voltado contra a corrente de deriva (barlavento), enquanto o lado oposto (sotavento) sofre um déficit sedimentar crônico, ficando exposto a processos erosivos severos e à rápida retração da linha de costa (BRUUN, 1988).

No contexto da Ilha do Maranhão, este fenômeno manifesta-se de forma acentuada na Praia da Ponta d'Areia, localizada na porção noroeste do município de São Luís. A construção do Espigão Costeiro da Ponta d'Areia reconfigurou drasticamente a paisagem e a circulação hidrodinâmica local. A estrutura funcionou como uma barreira física eficiente ao trânsito de sedimentos direcionado pelas correntes fluviais e de maré do Golfão Maranhense. O resultado imediato foi o aprisionamento massivo de sedimentos a barlavento, gerando uma extensa área de engorda praial e deposição que transformou a dinâmica socioambiental daquela porção da praia (SOUSA; CORRÊA, 2012).

Figura 2 : Visão aérea oblíqua da orla da Ponta d'Areia em baixa-mar, evidenciando a evolução do Espigão Costeiro. (a) Cenário no ano de 2015; (b) Cenário no ano de 2026, destacando a consolidação do enrocamento.



Fonte: Google Earth.

Portanto, a análise de sistemas costeiros modificados por obras de engenharia rígida exige abordagens de monitoramento com elevada resolução espacial e temporal. Entender como a linha de costa da Ponta d'Areia responde sazonalmente e durante eventos hidrodinâmicos extremos (como as marés de sizígia) a essa quebra do equilíbrio sedimentar é fundamental. A fundamentação dessas variações morfológicas permite validar o uso de novas ferramentas de base tecnológica e comunitária, a exemplo do projeto *CoastSnap*, correlacionando as flutuações óticas observadas com os impactos físicos consolidados pela presença do espigão na dinâmica de sedimentos.

2.3 Caracterização Sedimentológica e Textura de Sedimentos Praiais

A análise da textura dos sedimentos praias constitui uma ferramenta clássica e indispensável na Oceanografia Geológica para decifrar a hidrodinâmica e os processos deposicionais atuantes nas zonas costeiras. As configurações de grãos disponíveis na natureza apresentam uma elevada e complexa variabilidade dimensional, resultando na coexistência de partículas de múltiplos tamanhos em um mesmo ambiente natural. Compreender a relação entre a presença e as dimensões dessas frações fornece informações fundamentais sobre a proveniência do suprimento sedimentar (área fonte) e os mecanismos hidrodinâmicos e eólicos de transporte (agentes transportadores), mapeando a maturidade e a evolução física de uma determinada região costeira (MUEHE, 2006; SHORT, 1999).

Nas praias da Ilha do Maranhão, esse arranjo é fortemente condicionado pelas correntes geradas no sistema estuarino do Golfão Maranhense, onde o gradiente energético determina a assinatura textural ao longo do perfil entremarés (MENESES, 2021).

A granulometria define-se como o conjunto de métodos empregados para classificar, padronizar e estimar as dimensões dos grãos, viabilizando correlações espaciais e temporais a partir de suas propriedades físicas. Historicamente, essa determinação baseou-se em técnicas de particionamento mecânico por peneiramento em malhas padronizadas, expressas em função do peso retido (SUGUIO, 1973). Contudo, avanços geotecnológicos recentes consolidaram a técnica de Difração a Laser como um método de elevada reprodutibilidade, rapidez e precisão para a análise de sedimentos siliciclásticos (BLOTT; PYE, 2006).

No presente estudo, as análises foram realizadas por meio do granulômetro por difração a laser Horiba Partica LA-350 (*Partica Mini*), cujo funcionamento é baseado nos princípios óticos da Teoria de Espalhamento de Mie (MIE, 1908). Quando os grãos de areia são introduzidos em fluxo contínuo na célula de dispersão em suspensão aquosa, eles interagem com o sistema de fontes de luz do equipamento. Partículas de dimensões maiores desviam a luz laser em ângulos pequenos e com alta intensidade, enquanto partículas menores dispersam a luz em ângulos maiores e menor intensidade (ISO 13320, 2020). Os sensores óticos de silício de alta resolução captam esses padrões de refração angular e, através de inversões computacionais matemáticas, geram de forma automatizada os percentis acumulados associados ao diâmetro esférico

2.3.1 Escalas Granulométricas

Ao longo do desenvolvimento da sedimentologia, diversos modelos foram propostos para categorizar geometricamente os sedimentos. Embora os primeiros sistemas seguissem progressões puramente matemáticas — a exemplo da escala de Atterberg —, eles foram academicamente descontinuados por agruparem partículas com comportamentos dinâmicos de transporte e deposição marcadamente distintos (SEED et al., 1967). Em 1922, Wentworth elaborou uma classificação empírica baseada no tipo de transporte litorâneo, associando limites de classe específicos expressos em milímetros. Posteriormente, Krumbein (1934) desenvolveu uma escala logarítmica para otimizar o tratamento estatístico desses intervalos, convertendo os valores métricos para uma unidade adimensional denominada phi, calculada por meio da Equação 1:

$\phi = -\log_2 d(\text{mm})$ Em que d é o tamanho de “d” é expresso em mm

Tabela 1: Recorte da escala granulométrica integrada de Wentworth (1922) e Krumbein (1934) com foco na fração areia.

Intervalo em Milímetros (mm)	Intervalo em Unidades Phi (ϕ)	Classificação do Sedimento
1,00–0,50	0,00–1,00	Areia Grossa
0,50–0,25	1,00–2,00	Areia Média
0,25–0,125	2,00–3,00	Areia Fina
0,125–0,0625	3,00–4,00	Areia Muito Fina
<0,0625	>4,00	Finos (Silte e Argila)

Fonte: Adaptado de Wentworth (1922) e Krumbein (1934).

2.3.2 Parâmetros Estatísticos

As análises estatísticas aplicadas à sedimentologia buscam decifrar as propriedades físicas de um universo amostral. Com o objetivo de padronizar a interpretação ambiental de depósitos arenosos, Folk e Ward (1957) e Folk (1968) desenvolveram formulações matemáticas baseadas em percentis gráficos retirados da curva de frequência cumulativa na escala phi. No presente estudo, adota-se este conjunto de parâmetros clássicos para avaliar as respostas morfo-sedimentares da face praial a sotavento do espigão da Ponta d'Areia (PEREIRA, 2018).

O Diâmetro Médio atua como uma medida de tendência central, calculada a partir da média ponderada dos percentis óticos 16, 50 e 84 (Equação 2). Este parâmetro reflete a competência média do agente transportador e a energia média do fluxo no momento da deposição sedimentar (DIAS, 2004).

$$Mz = \frac{\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}}{3}$$

2.3.3 Grau de Seleção

O Grau de Seleção (σ), ou desvio padrão gráfico descritivo, mensura a variabilidade e a dispersão dos tamanhos de grãos em torno da média aritmética, funcionando como um indicador direto da maturidade textural da praia (Equação 3).

$$\sigma I = \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4} + \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6,6}$$

Depósitos que exibem pequenas variações dimensionais são classificados como bem selecionados, sugerindo uma ação hidrodinâmica persistente e constante na lavagem das frações finas (KOMAR, 1998). O enquadramento descritivo deste parâmetro segue os intervalos propostos por Folk (1968), destacados na Tabela 2.

Tabela 2 – Classes representativas do Grau de Seleção(σI) segundo Folk (1968).

Intervalo de σI (unidades ϕ)	Descrição Verbal da Seleção
<0,35	Muito bem selecionado
0,35–0,50	Bem selecionado
0,50–0,71	Moderadamente bem selecionado
0,71–1,00	Moderadamente selecionado

Fonte: Adaptado de Folk (1968).

2.3.4 Assimetria (Skl)

A Assimetria (Skl) é uma medida adimensional que indica o grau de afastamento, distorção e deformação lateral da curva de distribuição granulométrica em relação a uma curva normal perfeitamente simétrica (Equação 4).

$$Skl = \frac{\phi_{16} + \phi_{84} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{84} - \phi_{16})} + \frac{\phi_5 + \phi_{95} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{95} - \phi_5)}$$

Em termos sedimentológicos, dá-se o nome de distribuição aproximadamente simétrica quando há equivalência nas distâncias entre a média, a moda e a mediana, indicando um equilíbrio dinâmico local onde as populações de grãos grossos e finos encontram-se balanceadas na curva de frequência (CORREA, 2003). A classificação verbal da assimetria encontra-se padronizada na Tabela 3.

Tabela 3 – Classes centrais de Assimetria (SkI) segundo Folk (1968).

Intervalo de Assimetria (SkI)	Descrição Verbal	Inclinação dos Grãos
-0,30 a -0,10	Assimetria negativa	Assimétrica no sentido dos grosseiros
-0,10 a +0,10	Aproximadamente simétrica	Curva perfeitamente equilibrada
+0,10 a +0,30	Assimetria positiva	Assimétrica no sentido dos finos

Fonte: Adaptado de Folk (1968).

2.3.5 Curtose (K_G)

Por fim, a Curtose (K_G) quantifica o grau de afilamento ou achatamento do pico da curva de frequência em comparação com a distribuição gaussiana padrão (Equação 5).

$$K_G = \frac{\phi_{95} - \phi_5}{2,44(\phi_{75} - \phi_{25})}$$

Conforme proposto por Folk (1968), curvas cujo pico de frequência assemelha-se perfeitamente à distribuição normal são denominadas mesocúrticas, refletindo que o processo de seleção atuou de forma homogênea sobre toda a amostra sedimentar, conforme os limites numéricos descritos na Tabela 4.

Tabela 4 – Classes de Curtose (K_G) segundo Folk (1968).

Intervalo de Curtose (K _G)	Descrição Verbal da Curva	Comportamento do Pico
0,67-0,90	Platicúrtica	Curva ligeiramente achatada
0,90-1,11	Mesocúrtica	Curva normal (gaussiana equilibrada)
1,11-1,50	Leptocúrtica	Curva ligeiramente pontiaguda

Fonte: Adaptado de Folk (1968).

2.4 Geotecnologias para Monitoramento da Linha de Costa e Perfil Praia

O avanço das geotecnologias aplicadas às ciências do mar nas últimas décadas transformou profundamente os métodos de monitoramento espacial e georreferenciado em zonas costeiras. Tradicionalmente dependente de levantamentos topográficos manuais pontuais e de imagens de satélite de baixa resolução temporal, a Oceanografia Geológica contemporânea absorveu ferramentas de sensoriamento remoto orbital e suborbital de alta frequência (MUEHE, 2020). Essas tecnologias permitem mapear as rápidas mutações morfológicas da linha de costa causadas por forçantes hidrodinâmicas sazonais ou de alta energia, fornecendo bases de dados robustas com alta acurácia tridimensional para o planejamento, engenharia e gestão de praias afetadas por processos erosivos (GONÇALVES; HENRIQUES, 2015)

2.4.1 Aerofotogrametria por VANT e Modelagem Digital (SfM)

O uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) consolidou-se como uma metodologia suborbital eficiente e de baixo custo para o monitoramento de alta resolução da face praial. Essa abordagem utiliza a aerofotogrametria baseada no algoritmo *Structure from Motion* (SfM), que reconstrói a geometria tridimensional (3D) da superfície a partir da sobreposição de imagens bidimensionais (2D) capturadas sob diferentes ângulos de visada (WESTOBY et al., 2012; MANCINI et al., 2013).

Contudo, para que os produtos gerados pelo SfM possuam validade métrica e acurácia topográfica em nível centimétrico, as imagens aéreas brutas precisam ser niveladas espacialmente a coordenadas geográficas de altíssima precisão obtidas no solo. Para isso, instalam-se na faixa praial os chamados Pontos de Controle no Solo (GCPs - *Ground Control Points*), cujas coordenadas horizontais (X, Y) e verticais (Z) são mensuradas em campo por meio de receptores geodésicos RTK-GNSS (*Real Time Kinematic - Global Navigation Satellite System*) (ROTNCKA et al., 2020). Após o processamento das feições homólogas das fotografias integradas aos GCPs em softwares fotogramétricos (como o *Agisoft Metashape*), geram-se dois produtos fundamentais: o Ortomosaico Digital, que consiste numa imagem aérea ortorretificada, e livre de distorções de perspectiva, e o Modelo Digital de Elevação (MDE), responsável pela representação altimétrica contínua da topografia do estirâncio (GONÇALVES; HENRIQUES, 2015).

2.4.2 Monitoramento Ótico Costeiro e Ciência Cidadã (*CoastSnap*)

Embora os levantamentos por VANTs e RTK-GNSS ofereçam elevada precisão, a sua execução diária ou horária torna-se inviável devido a limitações financeiras, regulatórias e logísticas de equipe. Nesse cenário, surgiram os sistemas de monitoramento ótico costeiro baseados em estações fixas de imagem, que atuam na captura contínua de parâmetros morfodinâmicos.

O projeto global *CoastSnap*, desenvolvido originalmente na Austrália por Harley et al. (2019), inovou ao aliar esse monitoramento de alta frequência temporal ao conceito de **Ciência Cidadã**, um modelo de pesquisa participativa que engaja a comunidade não científica e os cidadãos comuns na coleta de dados científicos estruturados (BONNEY et al., 2009).

A infraestrutura básica do *CoastSnap* consiste na instalação de uma estação fixa (totem) em um ponto elevado com visibilidade ampla para a face praial, servindo como gabarito para a captura de fotografias padronizadas pelos frequentadores da orla (Figura 3a). As instruções de enquadramento, ângulo e envio das imagens estão dispostas em um painel informativo instalado no local (Figura 3), orientando o colaborador a enviar a fotografia via aplicativo ou *QR Code* (HARLEY et al., 2019).

Figura 3: Estação *CoastSnap*-MA na Praia da Ponta d'Areia (a); Instruções de Passo a Passo Contidas na Placa Proximo ao Totem *CoastSnap* - MA.



Fonte : Dados da pesquisa (2026).

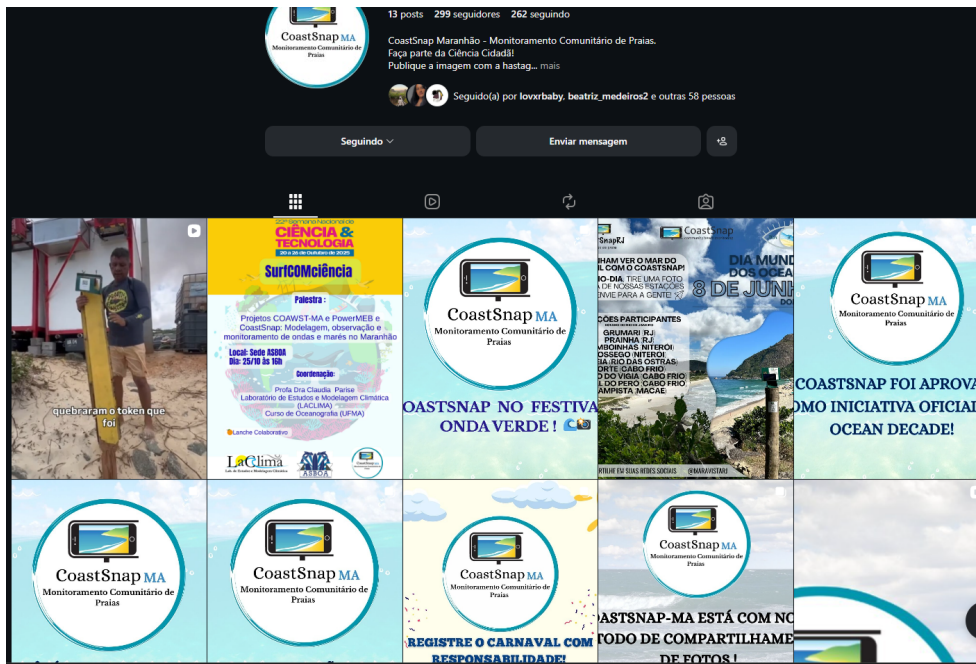
O fluxo metodológico para o envio das imagens pelo usuário consiste em três etapas sequenciais descritas no painel informativo da estação: primeiramente, o colaborador apoia o smartphone na posição horizontal (modo paisagem) sobre a cavidade padronizada do totem metálico, garantindo a fixação do ângulo e do azimute de visada; em seguida, realiza o registro fotográfico da face praial sem alterar o enquadramento; por fim, efetua o envio do arquivo para a base de dados do projeto por meio da leitura do *QR Code* disposto na placa ou via aplicativo de mensagem instantânea WhatsApp (HARLEY et al., 2019; LEISNER et al., 2024).

Através de pontos de controle conhecidos fixados na paisagem antropizada (GCPs fixos, como quinas de prédios ou postes), o software realiza uma retificação geométrica e uma transformação de perspectiva fotogramétrica. Esse processo converte a imagem oblíqua e distorcida do celular em uma imagem ortogonal plana (em planta), cujos pixels passam a ter uma escala métrica exata em metros (LEISNER et al., 2024). A partir dessa matriz retificada, o sistema detecta de forma automatizada ou semi-automatizada o contraste de cor entre a areia molhada e a água, mapeando a posição exata da linha de costa de alta frequência temporal.

2.4.3 Percepção Ambiental e Gestão Costeira Participativa

A utilização de perfis em redes sociais digitais, como o Instagram do *CoastSnap-MA* (Figura 4), atua como um canal direto de extensão universitária e comunicação científica. Por meio dessa plataforma, a equipe do projeto publica posts educativos sobre a erosão praial, divulga ações em eventos (como a Semana Nacional de Ciência & Tecnologia) e compartilha alertas comunitários a exemplo dos registros sobre danos e manutenção na infraestrutura física do totem. Essa estratégia de comunicação contínua aproxima a comunidade acadêmica do público leigo, transformando a rede social em uma ferramenta ativa de engajamento, conscientização socioambiental e validação do pertencimento social na gestão do ecossistema praial da Ponta d'Areia.

Figura 4 : Interface do perfil oficial do projeto CoastSnap-MA no Instagram, evidenciando as publicações.



A consolidação do engajamento comunitário em iniciativas de Ciência Cidadã é fortemente impulsionada pela integração com as redes sociais (Instagram e Facebook) e aplicativos de mensagem instantânea WhatsApp. Essas plataformas operam como canais bidirecionais de comunicação: além de facilitarem a submissão rápida e desburocratizada de dados fotográficos via *QR Code*, atuam na difusão de conteúdos educativos e na devolução dos resultados científicos para a comunidade (*feedback loop*). (HARLEY et al., 2019; MANCINI et al., 2020).

Em ambientes praias densamente urbanizados e modificados por estruturas antropogênicas, a exemplo da Praia da Ponta d'Areia, fundamenta-se na necessidade de integrar a dimensão social aos dados puramente físicos obtidos por drones e sensores óticos (SANTOS et al., 2012). Conforme preconizado pelas diretrizes do Gerenciamento Costeiro Integrado (GCI), a gestão eficiente do litoral não deve se restringir a intervenções técnicas unilaterais, mas sim promover a governança participativa.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo Geral

Analisar as potencialidades e limitações do sistema *CoastSnap* no monitoramento morfodinâmico da Praia da Ponta d'Areia, validando os dados óticos participativos a partir de levantamentos aerofotogramétricos por VANT, análises granulométricas e extração computacional da linha de costa, e avaliação do engajamento social.

3.2. Objetivos Específicos

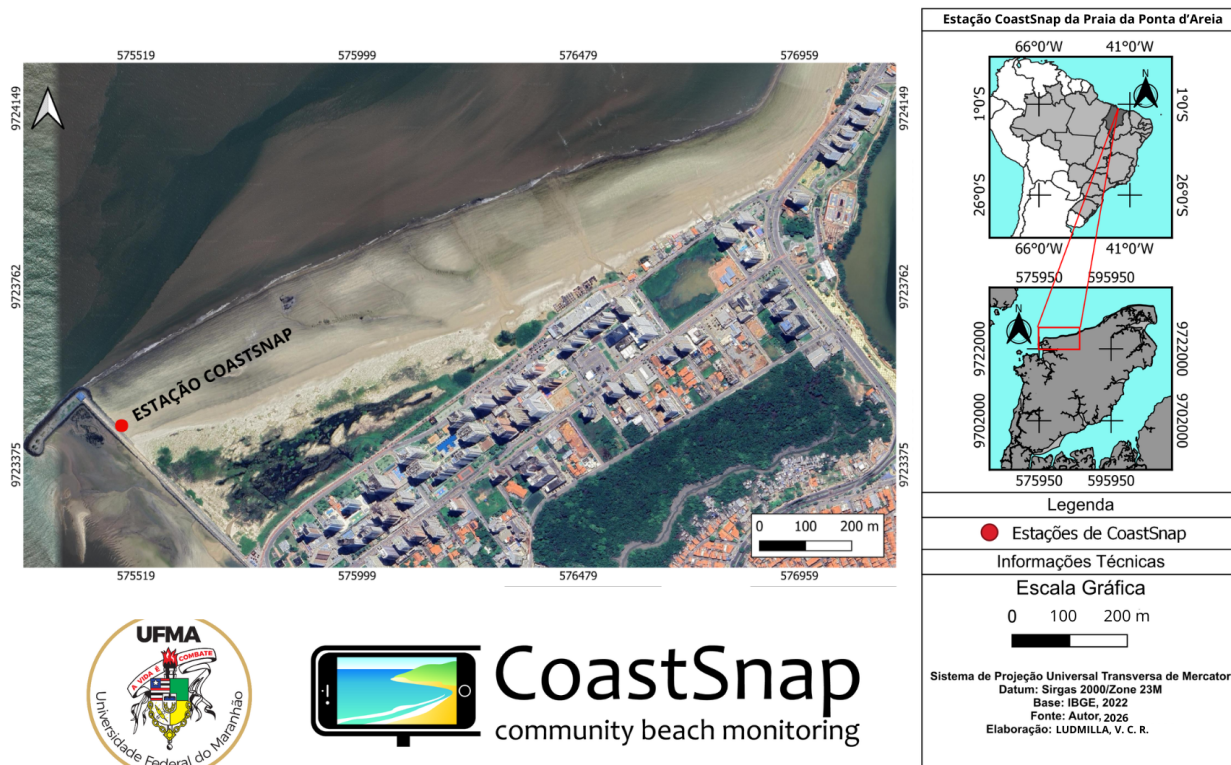
- Registrar e analisar imagens padronizadas da Praia da Ponta d'Areia durante um ciclo completo de maré de sizígia, por meio do método de ciência cidadã do Projeto *CoastSnap*, extraindo da imagem a retificação e posições da linha de costa;
- Realizar levantamento topográfico de referência na faixa entremarés para compará-los estatisticamente com as linhas de costa extraídas através das imagens do *CoastSnap*, avaliando a acurácia, correspondência e confiabilidade entre os métodos;
- Caracterizar as propriedades granulométricas e os parâmetros estatísticos dos sedimentos ao longo do perfil praial transversal, a fim de relacionar a textura sedimentar com os padrões morfológicos e hidrodinâmicos observados;
- Analisar a aplicabilidade técnica e as limitações operacionais do sistema *CoastSnap* em um ambiente costeiro dominado por macromarés, integrando esses resultados à avaliação do nível de percepção e engajamento dos frequentadores da praia.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Área de estudo

O estudo foi desenvolvido na Praia da Ponta d'Areia, situada no município de São Luís – MA , na margem oriental do Golfão Maranhense(Figura 1). Esta região é marcada por um regime de macromaré, com ampla variação do nível da água e forte atuação de processos hidrodinâmicos associados a ondas, correntes de maré e ventos sazonais (LIMA et al., 2014). A presença do espigão costeiro contribui para modificar o transporte sedimentar local, alterando padrões de corrente e redistribuição de sedimentos ao longo da praia (NEVES et al., 2012; SANTOS et al., 2012; SOUSA & CORRÊA, 2014), tornando a área particularmente sensível a eventos de alta energia, como as marés de sizígia, que intensificam os processos erosivos e deposicionais característicos de ambientes de macromaré.

Figura 5 : Mapa de localização da estação *Costsnap* da Praia da Ponta D'Areia - MA



Fonte: Google Satellite – Google LLC. Dados de imagem obtidos via Google Earth/Maps.
Organização e elaboração cartográfica: Ludmilla V. Carvalho (2026), QGIS 3.x.

Regionalmente, a área de estudo está inserida no contexto macro-tidal do Golfão Maranhense, um sistema estuarino complexo dominado por um regime de macromarés semidiurnas com amplitudes que frequentemente ultrapassam 6,5 metros durante as marés de sizígia (MENESES, 2021). De acordo com Muehe (2006), esse gradiente micromorfológico e energético gera correntes de maré bidirecionais de alta velocidade que, agindo em sinergia com o clima de ondas locais (geradas por ventos locais) e de largo (*swell*), constituem os principais agentes hidrodinâmicos responsáveis pelo balanço sedimentar e pela evolução espaço-temporal da linha de costa.

A área de amostragem específica compreende a zona de influência direta do espigão costeiro da Ponta d'Areia, uma estrutura rígida de engenharia costeira (tipo transversal) construída com a finalidade de conter o avanço da linha de costa e mitigar processos erosivos que afetavam a infraestrutura urbana adjacente (Figura 4). O escopo desta pesquisa concentra-se estritamente no setor de sotavento da referida obra de abrigo, contemplando as estações de amostragem georreferenciadas (Figura 4). Conforme preconizado por Komar (1998) e Pereira (2018), o setor de sotavento localiza-se a jusante do fluxo preferencial do transporte longitudinal de sedimentos por deriva litorânea — que na Ilha do Maranhão atua predominantemente no sentido NE-SW —, configurando uma zona de "sombra de sedimentos" caracterizada por um persistente déficit no balanço sedimentar local.

3.2. Monitoramento da Variação da Linha de Costa via Ciência Cidadã (*CoastSnap*)

Para a quantificação e o mapeamento temporal das oscilações da linha de costa na Praia da Ponta d'Areia, aplicou-se a metodologia de base comunitária e ciência cidadã fundamentada no protocolo global *CoastSnap* (HARLEY *et al.*, 2019). O procedimento baseou-se na captura sistemática de fotografias digitais da face praial, sendo realizados registros contínuos através de um totem de 20 em 20 minutos. A consistência e o controle geométrico rigoroso das imagens foram garantidos por meio do posicionamento fixo dos dispositivos em um suporte metálico padronizado e instalado permanentemente na porção emersa da praia, convertendo as fotografias oblíquas em dados geográficos precisos e mapas bidimensionais.

Figura 6: Coleta de pontos de controle fixos (GCPs) com equipamento GNSS, no Espigão da Ponta d' Areia , do dia 18/05/2026.



Fonte : Autor (2026).

O fluxo de processamento dessas imagens digitais ocorre em ambiente MATLAB e inicia-se com a retificação geométrica, etapa que utiliza algoritmos matemáticos para eliminar as distorções provocadas pela inclinação natural do celular e pelas variações de lente (LIPPMANN; HOLMAN, 1989). Para que essa correção ocorra, o programa utiliza Pontos de Controle no Solo (GCPs), que são feições fixas e não fixas de coordenadas geográficas reais conhecidas e mapeadas previamente em campo na paisagem urbana da Ponta d'Areia, em rochas, quinas e muros de edifícios.

Na etapa subsequente, o algoritmo realiza a transformação e a ortorretificação de coordenadas, projetando os pixels da imagem corrigida em uma grade plana horizontal em planta baixa. Esse processo permite a conversão das coordenadas de pixel bidimensionais da imagem em coordenadas geográficas reais de solo, gerando uma imagem retificada em escala real na qual cada pixel passa a corresponder a uma distância métrica real conhecida na praia (TURNER et al., 2016). Com a imagem mapeada, realiza-se a extração precisa da linha de costa por meio do processamento digital de imagem, adotando-se o indicador visual da linha de topo do estirâncio ou a linha de flutuação da maré através da diferença de contraste óptico e coloração entre os pixels de areia e água.

Para a aplicação prática na área de estudo da Ponta d'Areia, o monitoramento absorve as particularidades do regime de macromarés . Esse cenário caracteriza-se por influências hidrodinâmicas extremas que ultrapassam os 6,5 metros durante os eventos de sizígia, gerando correntes de maré altamente energéticas e promovendo uma expressiva variação horizontal na largura do estirâncio exposto. O processamento das imagens é calibrado levando em consideração a tábua de marés local no momento exato em que a fotografia foi tirada.

3.3 Amostragem Sedimentológica e Procedimentos de Campo

Os trabalhos de campo voltados à amostragem física dos depósitos sedimentares foram executados de maneira integrada e simultânea aos levantamentos morfológicos, abrangendo as quatro estações fixas de monitoramento localizadas a sotavento do espigão. De modo a otimizar a representatividade espacial do perfil praial, as coletas foram programadas e executadas rigorosamente durante as janelas de baixa-mar de sizígia, garantindo a máxima exposição da face do estirâncio (zona entremarés), onde a interação hidrodinâmica entre as ondas e o substrato é mais intensa (WRIGHT; SHORT, 1984).

Adotando-se os critérios metodológicos recomendados por Suguio (1973) para estudos de dinâmica costeira, os procedimentos amostrais consistiram na raspagem e coleta exclusiva do sedimento superficial, englobando apenas os primeiros dois centímetros superiores do depósito (camada ativa). Alíquotas homólogas de aproximadamente 2 mL de sedimento bruto de cada ponto foram imediatamente transferidas para microtubos plásticos de alta estanqueidade do tipo *Eppendorf*, devidamente codificados e georreferenciados, e encaminhadas ao laboratório para triagem instrumental.

Figura 7 : Amostragem manual de sedimentos superficiais.



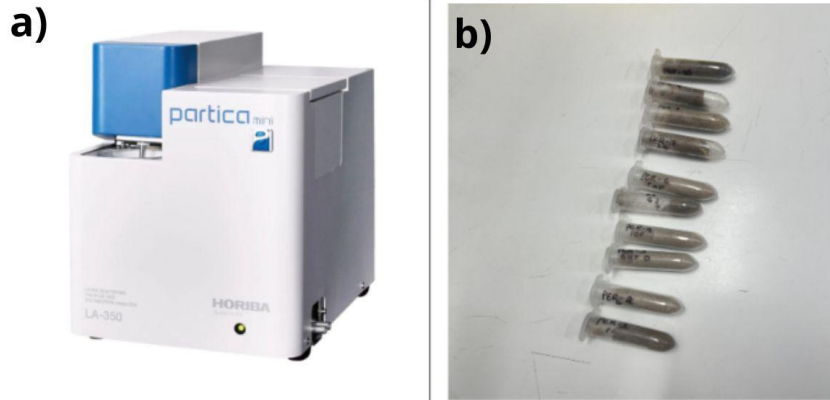
Fonte : Autor (2026).

Alíquotas homólogas de aproximadamente 2 mL de sedimento bruto de cada ponto foram imediatamente transferidas para microtubos plásticos de alta estanqueidade do tipo *Eppendorf*, devidamente codificados e georreferenciados, e encaminhadas ao laboratório para triagem instrumental.

3.4 Análise Granulométrica Instrumental por Difração a Laser

A determinação da distribuição de tamanho de grão das amostras foi realizada por via úmida utilizando o granulômetro por difração a laser Horiba Partica LA-350 (*Partica Mini*). O funcionamento deste equipamento baseia-se nos princípios físicos consolidados pela Teoria de Espalhamento de Mie e pela aproximação de Fraunhofer, em conformidade com as diretrizes internacionais estabelecidas pela norma ISO 13320 (2020).

Figura 8: Etapa de análise granulométrica por difração a laser: (A) Granulômetro Horiba Partica Mini LA-350 utilizado na mensuração das frações sedimentares; (B) Amostras de sedimentos da Praia da Ponta d'Areia



Fonte: Horiba Scientific (2026) (a); Autor 2026) (b).

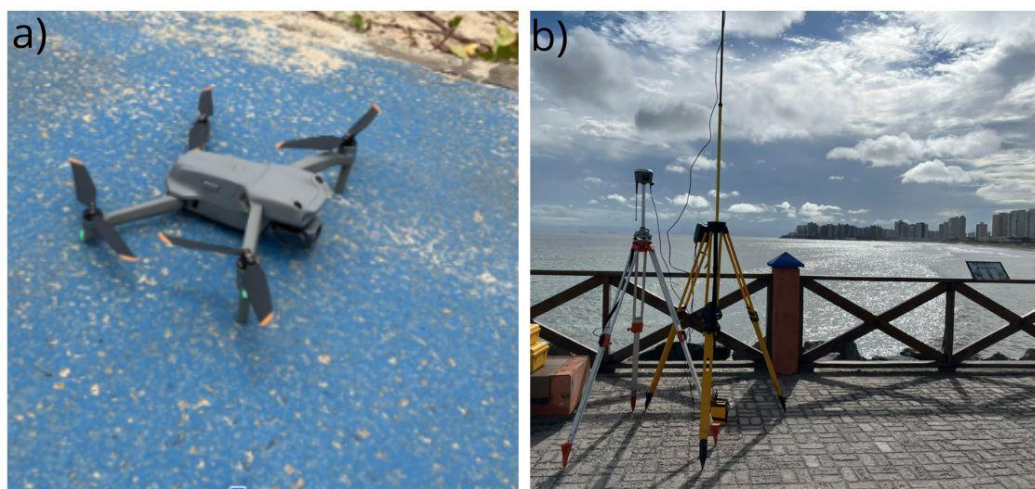
As análises foram realizadas por meio do granulômetro por difração a laser Horiba Partica LA-350 (*Partica Mini*), cujo funcionamento é baseado nos princípios óticos da Teoria de Espalhamento de Mie. A escolha pela difração a laser em detrimento do peneiramento mecânico tradicional justifica-se pela elevada reprodutibilidade, rapidez e sensibilidade do método óptico na detecção de frações micrométricas (BLOTT; PYE, 2006). Devido à automação do sistema hidráulico do equipamento que opera em fluxo contínuo de suspensão aquosa em meio interno e realiza o desconto automatizado do fundo óptico (*background*), não foi necessária a submissão das amostras arenosas aos protocolos convencionais e demorados de dessalinização (lavagem consecutiva com água destilada para remoção de halita) ou secagem térmica prévia em estufas laboratoriais

No momento do ensaio, o conteúdo bruto umedecido do microtubo *Eppendorf* foi introduzido diretamente na cuba de dispersão do equipamento, preenchida com água purificada e submetida à agitação mecânica constante. Ao interceptarem o feixe de luz laser emitido por uma fonte de diodo sólido, as partículas dispersas provocaram a refração e o espalhamento da luz em ângulos que são inversamente proporcionais às suas dimensões geométricas. Os sensores fotodiodos multi-elementares de alta resolução espacial registraram a intensidade e os ângulos de dispersão luminosa. Esses sinais foram processados matematicamente pelo software integrado do sistema, gerando as curvas de frequência granulométrica e os diâmetros esféricos equivalentes correspondentes aos percentis acumulados da amostra.

3.5 Levantamento Aerofotogramétrico e Posicionamento Geodésico (GNSS/RTK)

Para a caracterização morfológica tridimensional de alta resolução espacial e acompanhamento do balanço volumétrico da face praial a sotavento do espigão, foi executado um levantamento aero-fotogramétrico digital utilizando um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT / Drone) multi-rotor.

Figura 9: Instrumentação de campo para monitoramento costeiro: (A) Drone utilizado no imageamento aéreo; (B) Equipamento GNSS posicionado no Espigão Costeiro para determinação de coordenadas de precisão.



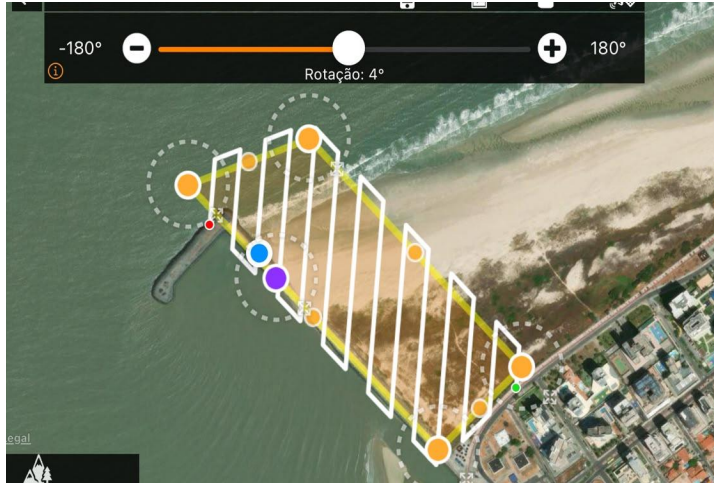
. Fonte: Dados da pesquisa (2026).

. O vetor aéreo operou equipado com um receptor GNSS embarcado com tecnologia RTK (*Real Time Kinematic*), capaz de obter posicionamento centimétrico instantâneo através do recebimento de correções diferenciais via link de rádio emitidas por uma estação base de solo instalada sobre um vértice geodésico de referência homologado. A adoção da tecnologia RTK mitigou a necessidade de implantação de uma malha densa de pontos de controle terrestres (GCPs), otimizando a acurácia altimétrica (Z) e planimétrica (X,Y) do imageamento (PEREIRA, 2018).

A utilização da tecnologia GNSS/RTK embarcada no vetor aéreo e posicionada na base terrestre desempenha um papel fundamental na validação e calibração das imagens do projeto *CoastSnap*. Como a Ciência Cidadã fornece fotografias oblíquas obtidas por celulares com variações de angulação e lentes sem calibração prévia (HARLEY et al., 2019), a modelagem tridimensional de alta precisão obtida pelo drone-RTK serve como o "dado de verdade terrestre" (*ground truth*). A acurácia centimétrica proporcionada pelo RTK elimina a dependência de uma malha densa de pontos de controle terrestres (GCPs) distribuídos na faixa praial, cuja implantação física é operacionalmente inviável e efêmera em ambientes de macromaré devido à rápida inundação da maré subente (MUEHE, 2006; PEREIRA, 2018). Dessa forma, os produtos gerados com RTK fornecem uma base de referência altimétrica e planimétrica de alta confiabilidade (MONICO, 2008; SEEGER, 2003) para retificar as imagens do *CoastSnap*, correlacionar as marcas da linha de costa e garantir o rigor metodológico no monitoramento da variação praial.

O funcionamento desse sistema geodésico baseia-se na constelação multi-GNSS, que capta simultaneamente os sinais de redes globais de satélites (como GPS, GLONASS e Galileo), permitindo a determinação de coordenadas tridimensionais a partir do cálculo do tempo de propagação do sinal de rádio até os receptores em solo e no vetor aéreo (MONICO, 2008). No entanto, para anular as distorções causadas pelas camadas atmosféricas e garantir o rigor exigido na modelagem costeira, o método cinemático em tempo real (RTK) atua comparando instantaneamente a fase das ondas portadoras recebidas pela base fixa (coordenada conhecida) e pelo receptor móvel (*rover*). Essa correção geométrica diferencial elimina os erros sistemáticos de órbita e propagação, o que viabiliza o mapeamento de microfeições morfológicas na praia da Ponta d'Areia com precisão milimétrica a centimétrica (SEEGER, 2003).

Figura 10: Planejamento da grade de voo fotogramétrico automatizado no setor a sotavento do Espigão Costeiro da Ponta d'Areia, evidenciando o polígono de amostragem e as faixas paralelas de varredura aérea.



Fonte: Autor 2026.

O planejamento aerofotogramétrico foi configurado em aplicativo de navegação autônoma por meio da delimitação de um polígono de varredura retangular cobrindo a faixa praial, a berma e o setor de sotavento do espigão costeiro (**Figura 9**). A rota foi estruturada no formato de grade contínua com faixas paralelas ortogonais à orientação da linha de costa, ajustando-se a rotação do polígono para 4° de forma a otimizar a autonomia da bateria e garantir o recobrimento homogêneo da área de estudo (PEREIRA, 2018). As fotos foram capturadas com a câmera em ângulo nadir (90° em relação ao solo), assegurando a sobreposição longitudinal (*frontlap*) e lateral (*sidelap*) necessárias para a reconstrução tridimensional da praia pelo algoritmo de *Structure from Motion* (SfM) (WESTOBY et al., 2012).

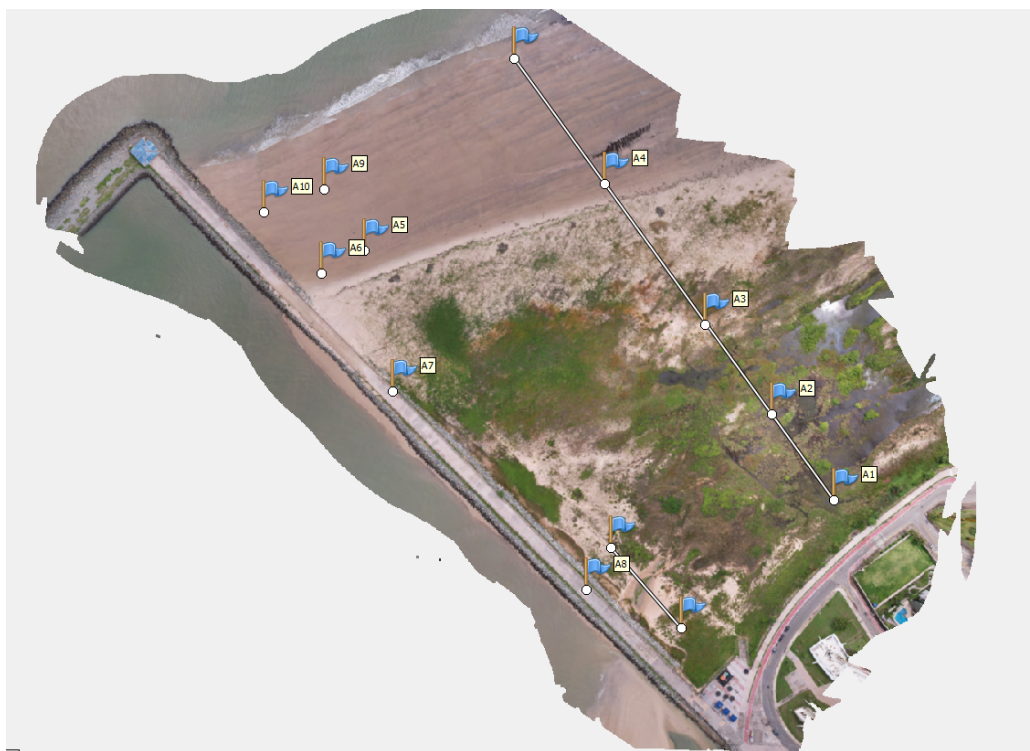
O pós-processamento digital das fotografias aéreas foi realizado em software de ambiente fotogramétrico baseado nos princípios de visão computacional e algoritmos de *Structure from Motion* (SfM) (FONSTAD et al., 2013). O fluxo de trabalho consistiu consecutivamente no alinhamento inicial das imagens, calibração óptica da câmera, geração de nuvem de pontos densa tridimensional e na estruturação da malha poligonal texturizada. Os subprodutos finais gerados e exportados compreenderam o Mosaico de Ortofotografia Digital e o Modelo Digital de Superfície, essenciais para o mapeamento e extração de feições morfológicas de alta precisão (MANCINI et al., 2013)

4. RESULTADOS

4.1 Caracterização Morfodinâmica e Compartimentação do Perfil Transversal via Drone RTK

A morfodinâmica em praias de macromarés exige alta precisão espacial devido à rapidez com que a zona de arrebentação por ondas translada sobre a face praial. O uso de levantamentos aerofotogramétricos com tecnologia RTK (*Real Time Kinematic*) permitiu a geração de Modelos Digitais de Elevação (MDE) e perfis topográficos transversais com acurácia centimétrica. Na Praia da Ponta d'Areia, essa metodologia foi fundamental para mapear as variações geométricas da face praial, identificar feições deposicionais e compartimentar o estirâncio, servindo como base para a análise do balanço sedimentar e das respostas morfológicas locais diante das forçantes oceanográficas.

Figura 11: Ortomosaico com a delimitação do perfil transversal e zoneamento ambiental na área de sotavento do Espigão Costeiro da Ponta d'Areia, São Luís - MA.



Fonte: Autor(2026).

O ortomosaico da Praia da Ponta d'Areia, gerado por meio do processamento computacional no software *Agisoft Metashape* a partir de imagens obtidas por VANT, permitiu mapear com precisão centimétrica a organização tridimensional dos subambientes costeiros (Figura 9). O principal elemento estruturador das análises morfológicas é o perfil topográfico transversal delineado digitalmente de forma contínua a partir da estação A1. Este transecto espacializa uma seção completa de transição ambiental no setor de sotavento do espigão costeiro, estendendo-se desde a franja continentalizada e antropizada adjacente ao calçadão urbano, cruzando as estações físicas de amostragem, e projetando-se digitalmente até a face ativa exposta à dinâmica das macromarés na linha de esvaziamento da maré.

A análise do mosaico aerofotogramétrico evidencia que o perfil inicia-se no ponto A1, implantado na porção mais interna do pós-praia, adjacente à infraestrutura viária. Esta zona caracteriza-se por uma morfologia suavizada e colonizada por vegetação pioneira de restinga, sofrendo forte pressão antrópica devido à proximidade com o calçadão da Ponta d'Areia. À medida que o caminhamento avança em direção à linha de costa, cruzando as estações intermediárias de amostragem física A2 e A3, o ortomosaico revela uma nítida mudança na rugosidade e na umidade do terreno. O contraste de coloração e textura na imagem discrimina com clareza a presença de zonas úmidas de retaguarda e pequenas poças de afloramento do lençol freático, adjacentes ao corpo vegetado.

Embora a amostragem física e a coleta de sedimentos em campo tenham se concentrado restritamente no setor vegetado de supramaré até a estação A4 (posicionada na rampa de deflação e transição para o pós-praia ativo), o perfil foi estendido computacionalmente sobre o modelo digital. Essa modelagem permitiu vetorizar o comportamento geométrico contínuo da rampa praial desprovida de vegetação até o limite visual do estirâncio inferior em baixa-mar.

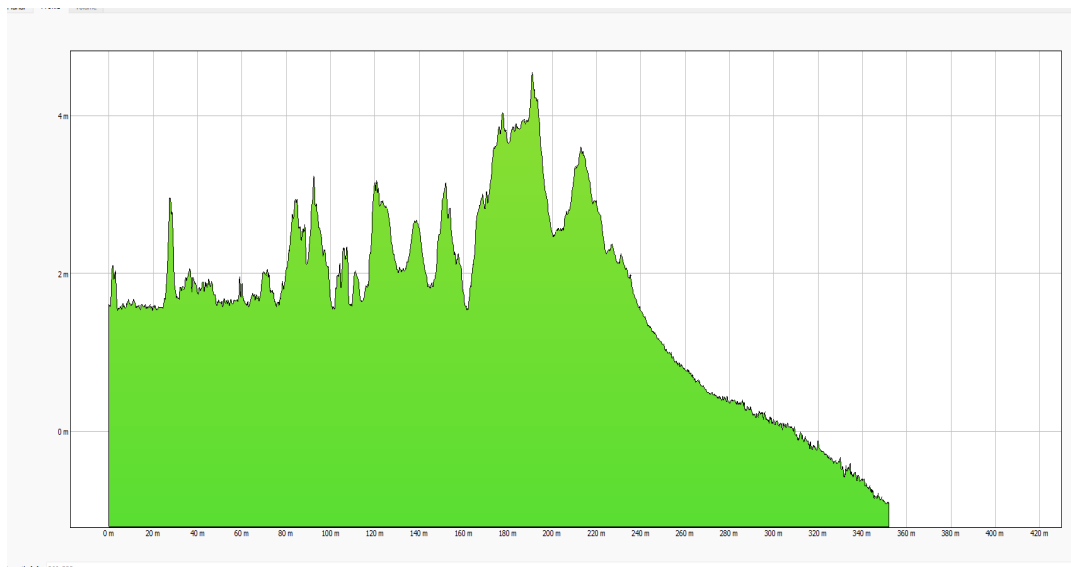
Os demais alvos plotados no plano como as estações A7 e A8, distribuem-se estrategicamente ao longo da estrutura rígida do espigão de pedras e do calçadão adjacente. Embora não componham a amostragem sedimentar linear do perfil principal, estes pontos serviram como balizadores de controle geométrico para validar a calibração altimétrica e assegurar a amarração espacial do modelo. Em síntese, o ortomosaico processado funciona como o mapa-base do trabalho, provando que a variação textural observada nas análises de laboratório está intrinsecamente associada aos compartimentos geomorfológicos perfeitamente individualizados e modelados pela imagem aérea.

A amostragem de sedimentos teve início na faixa de praia partindo do primeiro ponto (P1) localizado especificamente na área do Alvo 4, e avançou sequencialmente em direção à do perfil praial até o Alvo 1 (P10), onde a coleta foi finalizada. Dessa forma, a distribuição dos demais pontos contemplou tanto o topo das áreas de dunas quanto os setores rebaixados correspondentes às áreas alagadas. Essa correlação espacial entre as estações de amostragem e as cotas altimétricas mensuradas pelo Drone RTK permite confrontar diretamente a morfologia do terreno com as variações granulométricas que serão apresentadas a seguir

4.2. Perfil topografico

Para a caracterização geométrica e altimétrica da face praial, gerou-se o vetor transversal a partir do ortomosaico digital, cujos resultados e variações morfológicas estão representados no perfil topográfico da Figura 10.

Figura 12: Perfil topográfico bruto extraído diretamente da nuvem de pontos do Modelo Digital de Superfície (MDS) no *software* Agisoft Metashape, evidenciando o ruído e a alta frequência de variação topográfica.

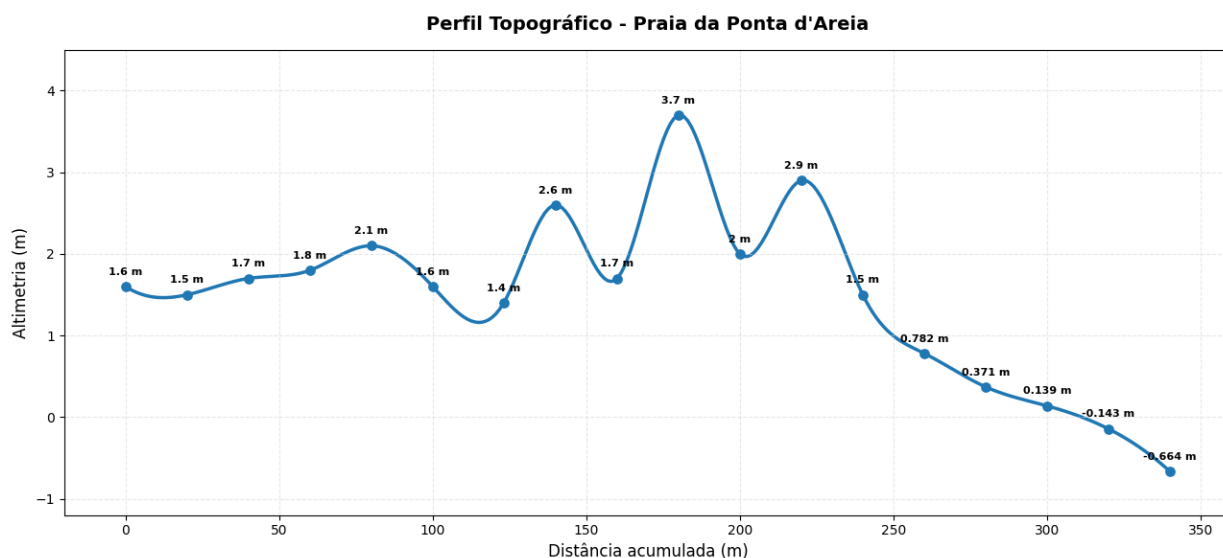


Fonte : Autor (2026).

A extração inicial do perfil topográfico gerada diretamente pelo software Agisoft Metashape apresentou um elevado grau de ruído e alta variabilidade local, decorrente da densidade de pontos do Modelo Digital de Superfície (MDS).

Para otimizar a visualização das macrofeições morfológicas e facilitar a interpretação dos compartimentos praias, aplicou-se uma reamostragem sistemática com intervalos regulares a cada 20 metros ao longo do transecto praiar.

Figura 13: Perfil topográfico suavizado da Praia da Ponta d'Areia a partir de amostragem em intervalos regulares de 20 metros, destacando as principais compartimentações morfológicas e a variação altimétrica ao longo do transecto.



Fonte: Dados da pesquisa (2026).

A partir do ortomosaico gerado, foi traçado um perfil topográfico transversal de diretriz norte-sul, estendendo-se por 340 metros de distância acumulada desde o setor de retro-estirâncio/vegetação até a zona de baixa-mar. A variação altimétrica obtida revela uma morfologia praiar altamente dinâmica e setorizada, influenciada diretamente pelas estruturas urbanas e pelo regime de macromarés da Ponta d'Areia.

Nos primeiros 100 metros do perfil (pontos de 1,6 m a 1,6 m), observa-se uma topografia suavemente ascendente correspondente à zona de dunas frontais e vegetação de restinga, atingindo cota máxima setorial de 2,1 m aos 80 metros. No entanto, o comportamento morfológico é abruptamente alterado a partir dos 120 metros de distância. Entre as estacas de 140 m e 220 m, o terreno apresenta duas cristas topográficas expressivas que atingem picos de 2,6 m e 3,7 m, intercaladas por uma depressão relativa de 1,7 m (cota aos 160 m de distância).

Esse arranjo sinusoidal reflete o padrão de deposição sedimentar influenciado pelo enrocamento (Espigão Costeiro), que atua retendo o sedimento transportado pela deriva litorânea e gerando bermas de tempestade proeminentes ou feições de empilhamento sedimentar induzido.

Após a crista principal aos 180 metros (cota de 3,7 m) e subsequente estabilização em 2,9 m (aos 220 m), o perfil inicia uma declividade acentuada e contínua em direção à face da praia e zona de intermaré (estirâncio). Os valores altimétricos decrescem progressivamente de 1,5 m (aos 240 m) até atingirem as cotas negativas na porção final do monitoramento, registrando -0,143 m aos 320 metros e culminando em -0,664 m. Essa transição geométrica com perfil de declive suave e dissipativo é característica de praias de macromaré no litoral maranhense, expondo uma ampla faixa de areia durante os eventos de maré baixa de sizígia.

4.3 GRANULOMETRIA DE SEDIMENTOS

Para a caracterização dos sedimentos da Praia da Ponta d'Areia, foram analisadas 10 amostras superficiais (denominadas de P1 a P10) coletadas ao longo do estirâncio. Os dados obtidos por difração a laser permitiram determinar a distribuição percentual das frações sedimentares e os parâmetros estatísticos de Folk e Ward (1957), sintetizados na Tabela 5

Tabela 5: Parâmetros estatísticos granulométricos descritos em Folk & Ward (1957) das amostras de sedimentos superficiais (P1 a P10) coletadas na área de dunas vegetadas da Praia da Ponta d'Areia.

	Média	Classificação	Mediana	Seleção	Classificação	Assimetria	Classificação	Curtose	Classificação
P1	2.487	Areia fina	2.469	0.4115	Bem selecionado	0.07432	Aproximadamente simétrica	0.9657	Mesocúrtica
P2	2.307	Areia fina	2.292	0.374	Bem selecionado	0.1026	Positiva	0.9521	Mesocúrtica
P3	2.325	Areia fina	2.315	0.3748	Bem selecionado	0.07533	Aproximadamente simétrica	0.9381	Mesocúrtica
P4	2.563	Areia fina	2.525	0.5586	Moderadamente selecionado	0.2379	Positiva	1.297	Leptocúrtica
P5	2.528	Areia fina	2.51	0.3882	Bem selecionado	0.09112	Aproximadamente simétrica	0.9903	Mesocúrtica
P6	2.528	Areia fina	2.51	0.3882	Bem selecionado	0.09112	Aproximadamente simétrica	0.9903	Mesocúrtica
P7	2.423	Areia fina	2.405	0.3917	Bem selecionado	0.1101	Positiva	1.037	Mesocúrtica
P8	2.451	Areia fina	2.442	0.369	Bem selecionado	0.07967	Aproximadamente simétrica	1.068	Mesocúrtica
P9	2.347	Areia fina	2.332	0.3791	Bem selecionado	0.112	Positiva	1.05	Mesocúrtica
P10	2.401	Areia fina	2.383	0.3894	Bem selecionado	0.1424	Positiva	1.12	Leptocúrtica

Fonte: Dados da pesquisa. Resultados obtidos por difração a laser (2026).

Em relação aos parâmetros estatísticos descritos em Folk & Ward (1957), o diâmetro médio confina todas as amostras na classe de Areia Fina (médias entre 2,30phi e 2,56 phi). O grau de seleção predominante nesse setor com vegetação é Bem Selecionado (valores em torno de 0,36phi a 0,41phi), com exceção apenas do ponto P4, que apresentou uma seleção ligeiramente menor, sendo classificado como Moderadamente Selecionado (0,55phi).

Tabela 6: Composição granulométrica percentual das frações de sedimentos superficiais na área de estudo.

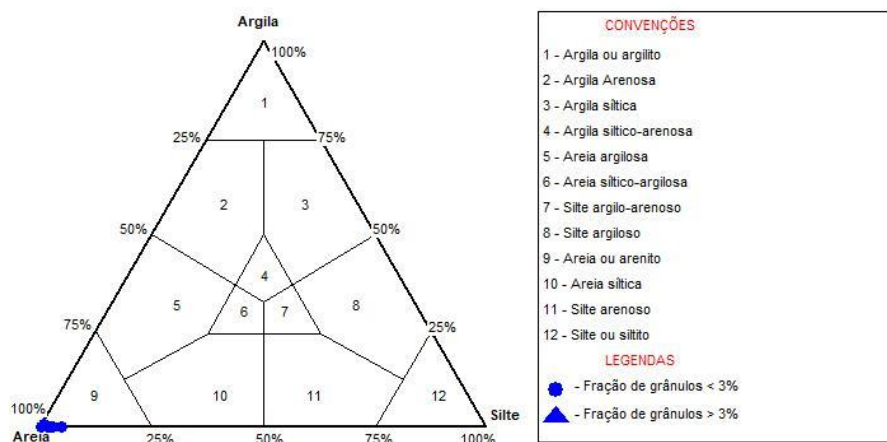
% Cascalho	% Areia	% Silte	% Argila
0	99,54	0,103	0,352
0	99,73	0	0,27
0	99,55	0	0,453
0	95,24	4,763	0
0	98,85	0,441	0,711
0	98,85	0,441	0,711
0	98,36	1,64	0
0	98,3	1,704	0
0	98,08	1,922	0
0	97,22	2,777	0

Fonte: Dados da pesquisa

A análise das frações sedimentares das amostras coletadas na área vegetada revelou uma homogeneidade textural extrema. Todas as dez estações amostradas (P1 a P10), localizadas na zona de supramaré com presença de vegetação pioneira, são constituídas quase na sua totalidade por fração areia, com valores que variam entre 95,24% e 99,73%. Constatou-se a ausência completa de cascalho (0% em todas as amostras) e índices muito baixos de finos, onde o silte variou de 0% a 4,76% e a argila não ultrapassou 0,71%.

A distribuição conjunta das três principais frações granulométricas finas e grossas (Areia, Silte e Argila) permitiu o agrupamento sistemático das estações de amostragem. O posicionamento plotado de cada amostra pode ser visualizado no diagrama triangular.

Figura 14: Diagrama ternário de classificação textural (Argila-Silte-Areia) adaptado segundo o método de Shepard (1954) para as amostras da Praia da Ponta d'Areia.

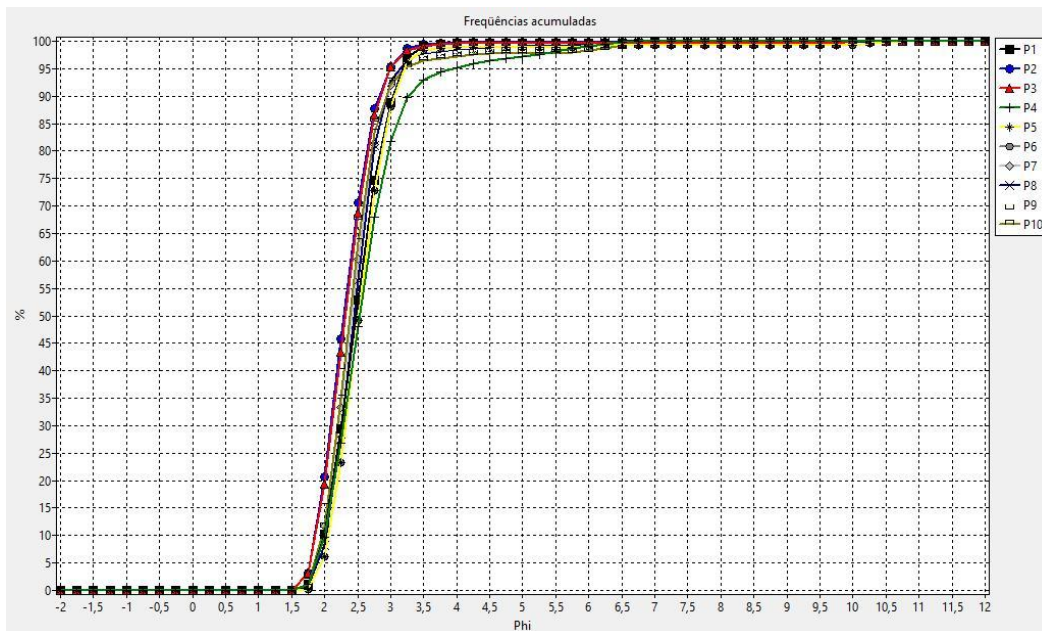


Fonte: Diagrama gerado pelo programa Sysgran 2003.

A classificação textural das amostras superficiais (P1 a P10), projetada no Diagrama de Shepard (Figura 11), evidenciou uma marcante homogeneidade sedimentar na Praia da Ponta d'Areia. Todas as estações amostrais posicionaram-se estritamente no vértice inferior esquerdo do diagrama ternário, sendo enquadradas no Campo 9, correspondente à classe das Areias ou Arenitos. Constatou-se uma participação nula ou insignificante das frações pelíticas (silte e argila), com teor de grânulos inferior a 3% em todo.

A distribuição do tamanho dos grãos e o comportamento do grau de seleção das amostras também podem ser avaliados graficamente a partir das curvas de frequência acumulada, geradas para as dez estações de amostragem (Figura 12).

Figura 15: Curvas de frequência granulométrica acumulada em escala Phi para as amostras superficiais (P1 a P10) da Praia da Ponta d'Areia.



Fonte: Frequência gerada pelo programa Sysgran 2003.

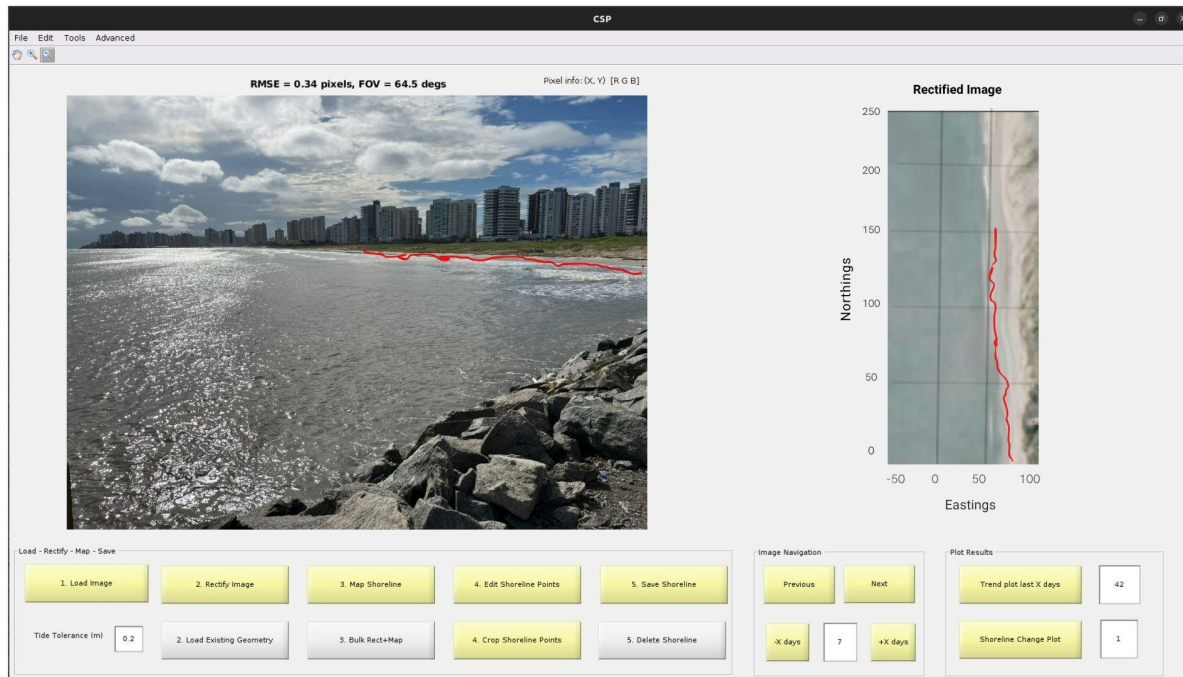
O comportamento hidrodinâmico e a distribuição granulométrica das estações refletem-se no paralelismo das curvas de frequências acumuladas (Figura 12). As curvas amostrais apresentam um perfil sigmoidal acentuadamente íngreme e concentrado, cujas inflexões principais ocorrem predominantemente no intervalo compreendido entre as classes de 1,5phi e 3,5phi. Esse comportamento gráfico demonstra que a quase totalidade do volume sedimentar retido por difração a laser corresponde a diâmetros característicos de areias finas, com alto grau de afunilamento estatístico entre as amostras.

4.4 Monitoramento Horizontal da Linha de Costa por Processamento Digital de Imagens

A aplicação da metodologia *CoastSnap* permitiu extrair e mapear a posição instantânea da linha de costa a partir das fotografias oblíquas adquiridas ao longo do monitoramento, foram registradas 20 fotos e selecionadas as três melhores devido a similaridade das fotos. O processamento fotogramétrico foi realizado em ambiente MATLAB por meio da rotina computacional do *CoastSnap Toolbox*, a qual executou a retificação das perspectivas imagens originais, projetando-as em um plano ortogonal (2D) baseado em coordenadas de GCPs fixos, conforme ilustrado nos produtos gerados à direita da interface gráfica.

A etapa de retificação foi fundamental para corrigir os desvios de perspectiva inerentes às lentes dos dispositivos móveis e compensar as variações de angulação nos registros fotográficos da Ciência Cidadã. O algoritmo de transformação projetiva converteu os píxeis das imagens oblíquas para o sistema de coordenadas geográficas reais, utilizando a malha topográfica tridimensional obtida via drone-RTK como referência altimétrica. Esse alinhamento rigoroso permitiu delimitar com alta acurácia a marca do espraiamento da maré e a posição do indicador morfológico da linha de costa nas três fotografias selecionadas.

Figura 16: Interface de retificação da imagem registrada no período matutino (08:20h) no dia 18/05/2026, para vetorização e monitoramento horizontal da linha de costa sob influência de macromaré.

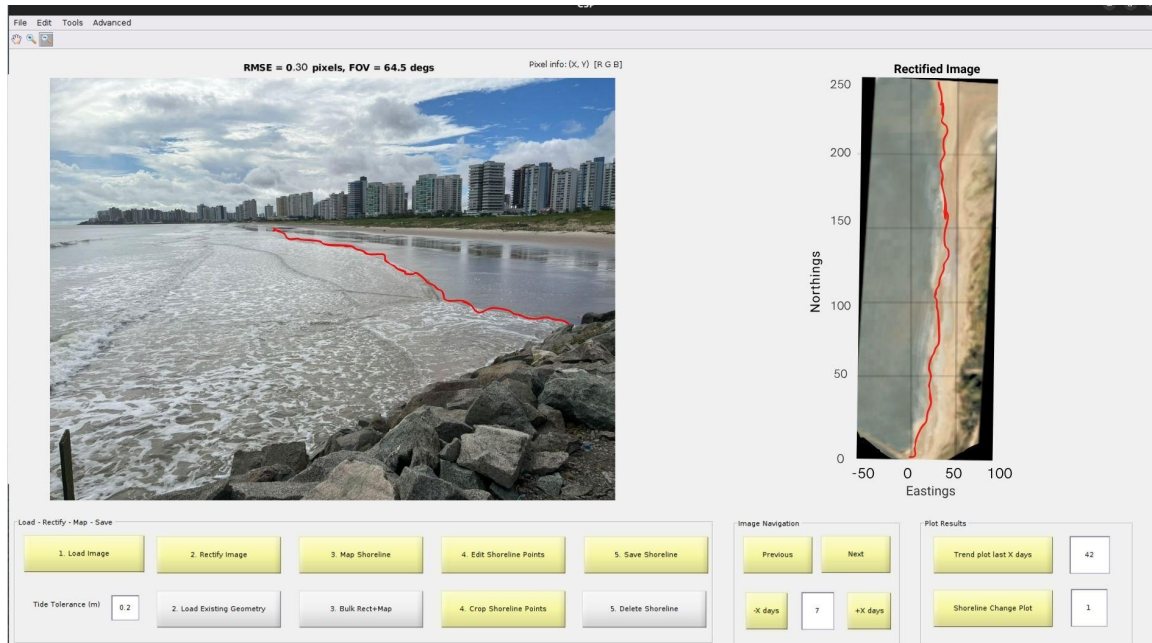


Fonte: Dados da pesquisa processados no Matlab (2026).

A análise do cenário das 08:20h revela que, embora a retificação polinomial via *CoastSnap Toolbox* tenha sido eficaz para o mapeamento bidimensional da linha de costa, a geometria de aquisição impõe limitações críticas à visualização da interface água-terra devido à altura do totem e ao ângulo oblíquo da captura.

Por estar instalada em uma cota altimétrica relativamente baixa e paralela ao plano de praia, a câmera sofre com o efeito de compressão de perspectiva (zona de sombra geométrica), o que provoca um mascaramento visual da franja de inundação à medida que a maré alta se aproxima da base do enrocamento de blocos rochosos.

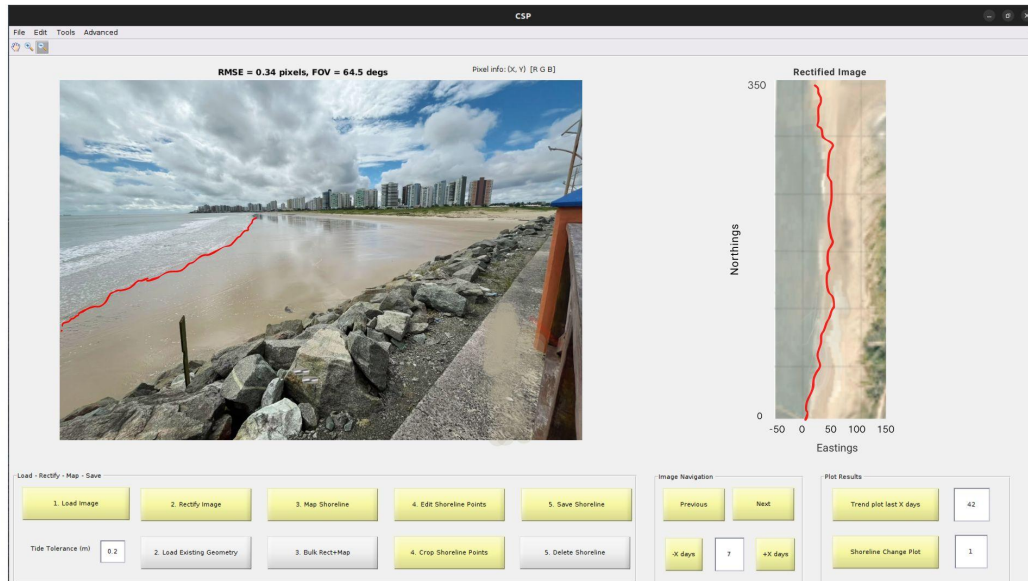
Figura 17: Interface de retificação da imagem registrada no período matutino (09:00h) no dia 18/05/2026, para vetorização e monitoramento horizontal da linha de costa sob influência de macromaré.



Fonte: Dados da pesquisa processados no Matlab (2026).

Em contrapartida, à medida que a maré recua em direção à baixamar, a geometria de imageamento melhora substancialmente, conforme evidenciado no cenário (09:00h). Com a exposição progressiva da face praial durante a vazante, a franja de inundação afasta-se da base do enrocamento urbano e projeta-se em direção ao centro do campo de visão. Fisicamente, a ampliação da área útil visível otimiza o alinhamento da matriz de transformação computacional, o que justifica o refinamento estatístico do modelo neste cenário, que registrou o menor índice de erro do trabalho ($RMSE = 0,30$ pixels), validando a alta precisão da vetorização manual em condições de maré intermediária a baixa.

Figura 18: Interface de retificação da imagem registrada no período matutino (10:20h), no dia 18/05/2026, para vetorização e monitoramento horizontal da linha de costa sob influência de macromaré.



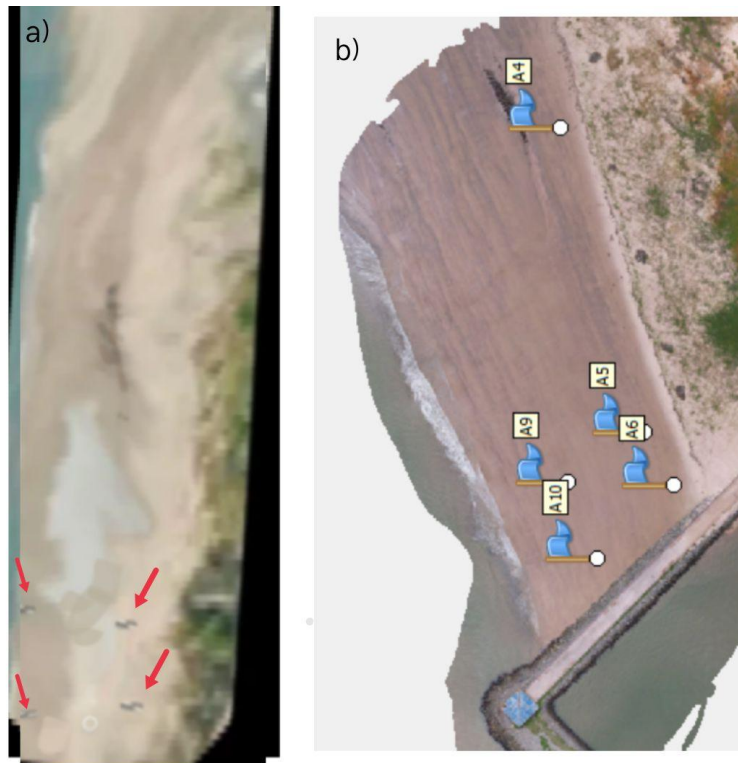
Fonte: Dados da pesquisa processados no Matlab (2026).

No cenário correspondente às 10:20h, o monitoramento via *CoastSnap* registrou o estágio avançado de vazante da macromaré, evidenciado pelo recuo acentuado da linha d'água. Esse processo hidrodinâmico resultou na exposição macroscópica da face da praia (estirâncio), afastando a interface mar-terra da estrutura rígida do enrocamento urbano. Do ponto de vista analítico, o modelo de transposição geométrica manteve uma elevada consistência estatística, apresentando um RMSE de 0,34 pixels. A ampliação da área útil arenosa visível e a ausência de obstruções visuais na franja de inundação permitiram uma vetorização manual precisa e contínua da linha de costa (feição em vermelho), validando a eficiência do algoritmo polinomial mesmo sob variações geométricas extremas na largura da praia.

4.1.3 Análise Comparativa de Acurácia Posicional: Retificação pelo Método CoastSnap e Processamento Fotogramétrico

Com o intuito de verificar a ocorrência de erros posicionais grosseiros ou deslocamentos bruscos no processo de georretificação manual, realizou-se uma validação cruzada sobrepondo a imagem retificada ao ortomosaico gerado pelo software Agisoft Metashape. Ambas as abordagens utilizaram como referência espacial os mesmos alvos de campo (GCPs A5, A6, A9 e A10) implantados no estirâncio da Praia da Ponta d'Areia, conforme apresentado na Figura 16.

Figura 19 – Comparativo visual entre o resultado da imagem aérea retificada de forma direta evidenciando os alvos (a) e o ortomosaico gerado por reconstrução fotogramétrica 3D no software Agisoft Metashape (b).



Fonte: Autor (2026).

A análise comparativa apresentada na Figura 16 revela que ambas as abordagens alcançaram uma convergência geométrica bidimensional satisfatória, permitindo a identificação e a correlação espacial dos mesmos alvos de campo na projeção horizontal. No entanto, os métodos diferem drasticamente em termos de rigor analítico e precisão altimétrica.

A técnica de retificação simples por transformação matemática polinomial atua meramente esticando e distorcendo a matriz de pixels bidimensional para forçar o encaixe nos pontos de amarração. Embora esse método mostre-se útil para composições visuais rápidas ou registros bidimensionais planos, ele ignora por completo a altimetria do terreno e é incapaz de corrigir as distorções radiais e tangenciais inerentes à lente da câmera do drone.

Em contrapartida, o processamento robusto no Agisoft Metashape baseia-se em algoritmos de correspondência multi-vista (*Structure from Motion* - SfM). Ao computar as sobreposições das imagens, o software reconstrói tridimensionalmente a geometria da praia, eliminando o efeito de perspectiva cônica da câmera (ortoretificação) e integrando o relevo ao produto final.

4.3. COASTSNAP- MA DADOS SOCIAIS

4.3.1 Participação por praia e turnos

A análise da percepção social é fundamental para compreender o papel da sociedade na gestão costeira, uma vez que o envolvimento dos atores locais contribui para a legitimidade e a efetividade das ações de monitoramento e conservação ambiental(LINS DE BARROS et al., 2023).

Tabela 7: Número de imagens coletadas por praia e turno (dia/noite).

Praia	Dia	Noite	Total
Ponta d'Areia	750	73	823

Fonte: Dados da pesquisa.

Provenientes de 1.198 voluntários, 823 imagens coletadas durante o período de monitoramento mostraram diferenças expressivas no engajamento da comunidade entre as duas praias monitoradas. A praia da Ponta d'Areia apresentou volume significativamente superior de contribuições, totalizando 823 imagens, o que representa 90,2% do total de fotografias enviadas.

4.3.2 Origem Geográfica dos Participantes

Tabela 8. Distribuição de participantes por estado (Brasil).

Estado	Participantes	%
MA	615	52,10%
SP	146	12,40%
PA	86	7,30%
RJ	53	4,50%
DF	33	2,80%
MG	31	2,60%
PI	30	2,50%
PR	26	2,20%
RS	25	2,10%
CE	20	1,70%
BA	19	1,60%
SC	16	1,40%
GO	15	1,30%
PE	11	0,90%
TO	8	0,70%
AM	8	0,70%
MS	7	0,60%
MT	7	0,60%
ES	6	0,50%
PB	4	0,30%
RR	4	0,30%
SE	3	0,30%
AL	3	0,30%
RO	3	0,30%
AP	1	0,10%
RN	1	0,10%
TOTAL	1.183	100%

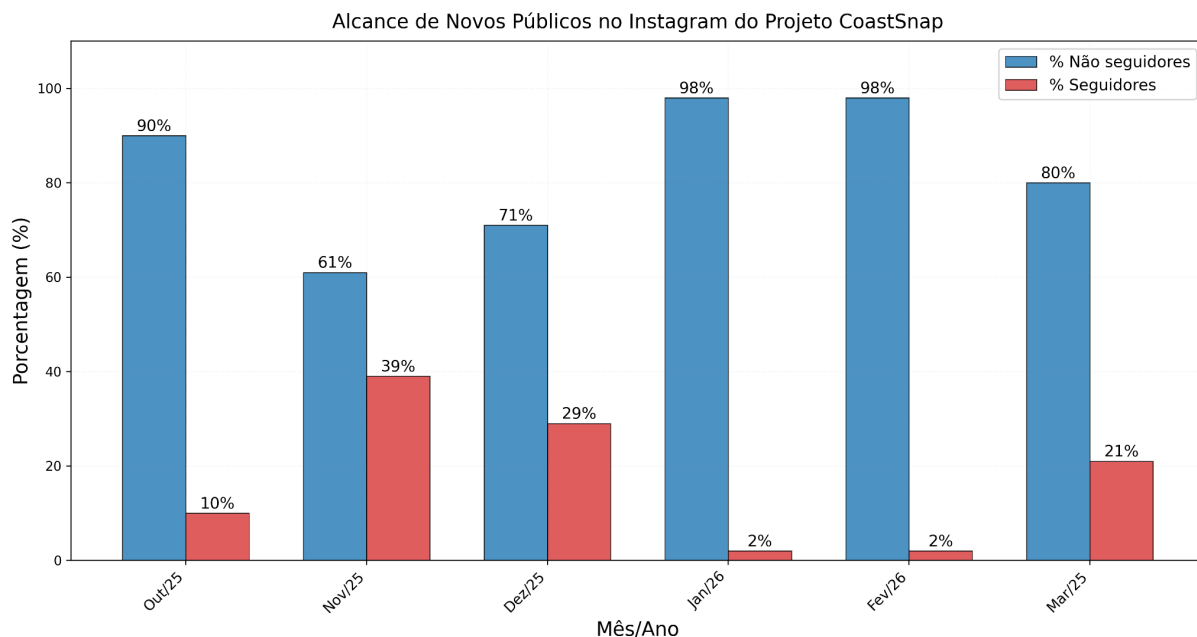
Fonte: Dados da pesquisa.

A análise da origem geográfica dos 1.198 participantes do projeto *CoastSnap-MA* revelou a presença de contribuições de 26 estados brasileiros, além do Distrito Federal. O estado do Maranhão registrou 615 participantes, representando 52,1% do total. São Paulo contribuiu com 146 participantes (12,4%), Pará com 86 (7,3%), Rio de Janeiro com 53 (4,5%) e Distrito Federal com 33 (2,8%). Os demais 22 estados somaram 283 participantes (23,7%) (Tabela 2).

4.3.2 Engajamento social e alcance digital do *CoastSnap-MA*

A análise do alcance das publicações no *Instagram* demonstra que o projeto *CoastSnap-MA* apresenta forte capacidade de atingir novos públicos, com predominância de visualizações por não seguidores ao longo do período analisado. Em meses como janeiro e fevereiro de 2026, esse percentual atingiu cerca de 98%, evidenciando amplo alcance externo.

Figura 20: Alcance de novos públicos no Instagram do projeto *CoastSnap-MA* (percentual de seguidores e não seguidores).

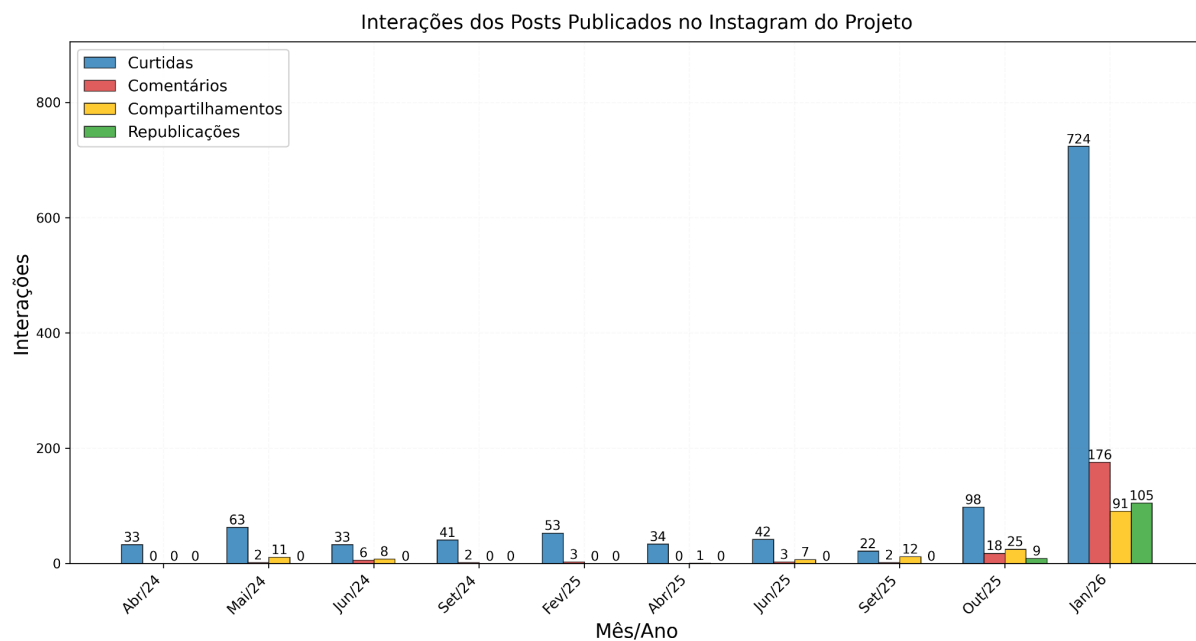


Fonte: Autor (2026).

Esse resultado indica o potencial do projeto como ferramenta de disseminação da ciência cidadã e educação ambiental, especialmente em áreas costeiras como São Luís. Ao alcançar usuários que ainda não acompanham o perfil, o *CoastSnap*-MA contribui para ampliar o conhecimento sobre processos costeiros e estimular a participação social. Por outro lado, a baixa proporção de seguidores revela a necessidade de estratégias voltadas à fidelização do público.

Já na análise das interações das publicações no Instagram do projeto *CoastSnap*-MA evidencia um crescimento gradual no engajamento ao longo do período analisado (Figura . Nos primeiros meses, observa-se baixo nível de interação, com predominância de curtidas e pouca participação por meio de comentários e compartilhamentos, indicando uma fase inicial de consolidação do perfil .

Figura 21: Engajamento das publicações no Instagram do projeto *CoastSnap*-MA.

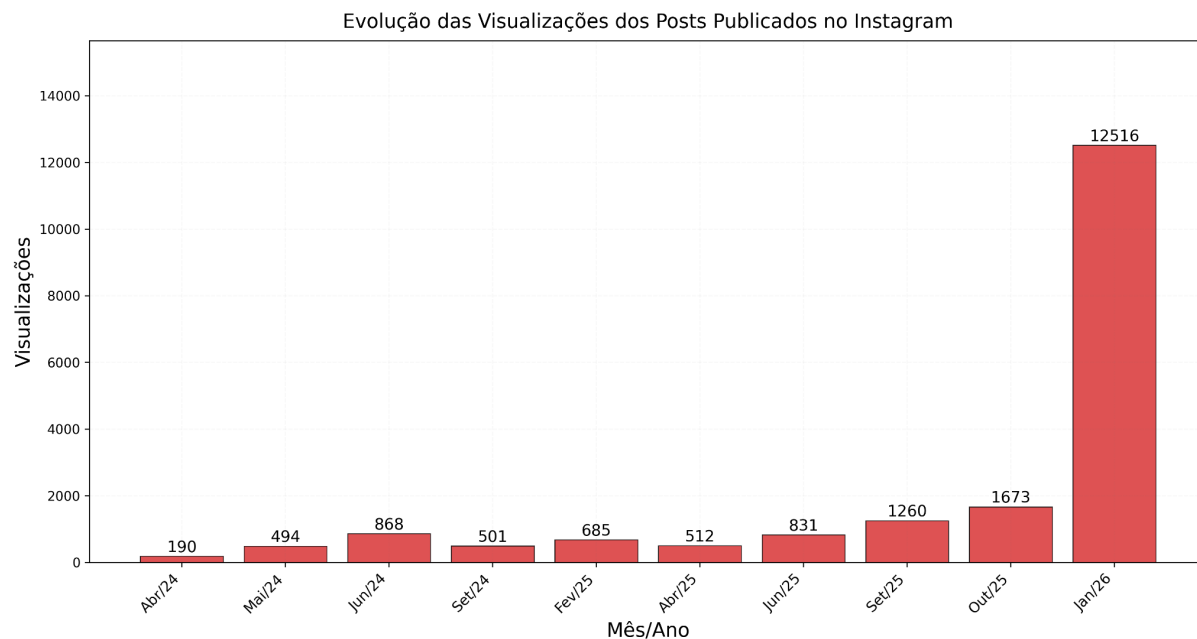


Fonte: Autor (2026).

A partir de 2025, verifica-se aumento progressivo nas interações, especialmente em comentários e compartilhamentos, o que demonstra maior envolvimento do público com o conteúdo. Esse comportamento indica uma transição de um público mais passivo para um público mais participativo, contribuindo para a ampliação do alcance das publicações. Destaca-se o mês de janeiro de 2026, que apresentou um crescimento expressivo em todas as métricas de engajamento.

Esse aumento está diretamente relacionado à repercussão de um episódio de vandalismo envolvendo a retirada do totem do *CoastSnap-MA*, amplamente divulgado nas redes sociais. A situação gerou maior visibilidade e mobilização do público, refletindo no aumento significativo das interações. Observa-se, uma variação significativa no número de visualizações das publicações ao longo do período analisado no Instagram do projeto *CoastSnap-MA*. A maioria dos meses apresenta valores moderados de alcance, com crescimento gradual ao longo do tempo .

Figura 22: Evolução das visualizações das publicações no Instagram do projeto *CoastSnap* (2024–2026)



Fonte: Autor (2026).

Destaca-se, entretanto, o mês de janeiro de 2026, que registrou um pico expressivo de 12.516 visualizações, valor significativamente superior aos demais períodos. Esse aumento atípico no alcance está associado à repercussão de um evento específico, relacionado ao vandalismo e retirada do totem do *CoastSnap-MA*. A situação gerou maior visibilidade nas redes sociais, especialmente a partir da divulgação de um vídeo produzido pela ASBOA, evidenciando as condições em que a estrutura foi deixada.

Esse episódio demonstra como eventos pontuais, sobretudo aqueles de caráter negativo ou de impacto social, podem influenciar diretamente o alcance das publicações, ampliando a visibilidade do projeto. Ao mesmo tempo, evidencia o potencial das redes sociais como ferramenta de denúncia, sensibilização e mobilização da comunidade em relação à conservação de equipamentos e iniciativas de monitoramento ambiental.

4.4 Aspectos Morfológicos e Interferências Antrópicas

A análise espacial realizada a partir do ortomosaico digital permitiu identificar que a morfologia da Praia da Ponta d'Areia é fortemente condicionada pela presença do Espigão Costeiro. Esta estrutura rígida de engenharia atua como uma barreira física artificial que intercepta a hidrodinâmica local e o transporte de sedimentos, dividindo a área de estudo em dois setores com comportamentos morfológicos distintos: a zona de barlavento e a zona de sotavento.

Figura 23: Afloramento de água por percolação subsuperficial e formação de poça na porção interna do calçadão durante a preamar de sizígia, evidenciando o caminho do fluxo hidráulico sob a estrutura costeira.



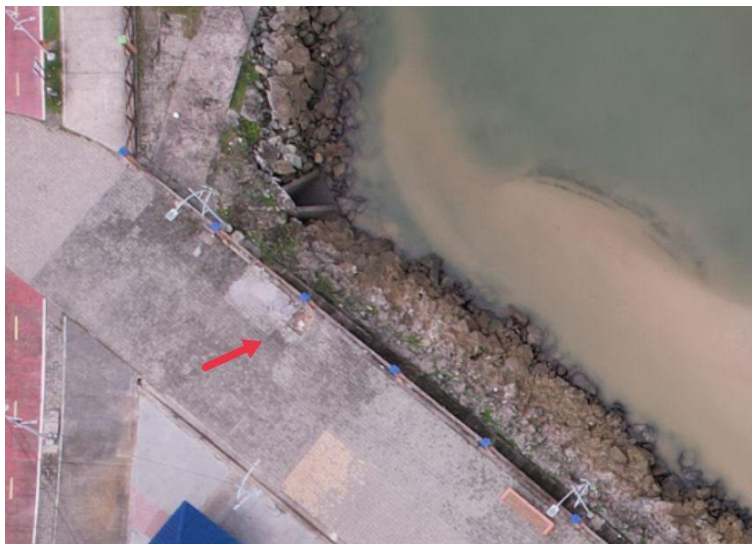
Fonte: Autor (2026).

No setor de barlavento (lado exposto ao fluxo direto das correntes litorâneas), os resultados visuais demonstram um acúmulo maciço de sedimentos arenosos, resultando no alargamento da faixa de praia. Em contrapartida, no setor de sotavento zona de "sombra hidrodinâmica" onde se localiza o ponto de controle A8 no ortomosaico, a dinâmica de deposição ocorre de maneira diferenciada. Neste trecho protegido, a redução da energia das ondas favoreceu o desenvolvimento de uma berma estável e de uma zona de supamaré larga o suficiente para permitir a fixação de vegetação rasteira pioneira.

As interferências antrópicas na Praia da Ponta d'Areia também se manifestam na deterioração das estruturas construídas na interface entre o continente e o oceano. A exposição contínua da Orla ao dinamismo hidrodinâmico das macromarés de sizígia e às intempéries climáticas tem acelerado o desgaste físico dos elementos urbanos, resultando em cenários visíveis de degradação socioambiental e estrutural.

A formação de afloramentos hídricos e poças na porção continental do calçadão durante as preamares é impulsionada pelo elevado gradiente hidráulico gerado pelas macromarés de sizígia. Durante a elevação do nível do mar, a água infiltra pela base do enrocamento de proteção e percola através da matriz sedimentar arenosa por baixo da estrutura urbana. Esse fluxo subterrâneo contínuo atinge o setor rebaixado à sotavento do calçadão, emergindo na superfície por meio de conexões hidráulicas diretas. Paralelamente ao acúmulo superficial de água, a vazão subsuperficial induz o processo de erosão tubular, no qual a força de arraste da percolação carrega os sedimentos finos do substrato. A remoção progressiva dessa matriz sedimentar solapa a base de sustentação da obra de engenharia, criando vazios subterrâneos que culminam no abatimento estrutural do pavimento.

Figura 24 – Imagem aérea de alta resolução, indicando (seta vermelha) o calçadão erodindo.



Fonte: Autor (2026).

Evidências de processos erosivos associados à degradação da infraestrutura urbana também foram registradas ao longo do calçadão da praia. Observou-se o colapso e a subsidência (afundamento) do pavimento de blocos intertravados, gerando uma cavidade por subescavação. Esse dano estrutural expõe a perda do sedimento subsuperficial que dava sustentação ao piso, logo acima da linha do enrocamento de proteção. Essa ruptura na superfície do calçadão não apenas compromete a integridade da obra de engenharia costeira, mas também representa um risco iminente à segurança dos pedestres e frequentadores da orla

Paralelamente à degradação da infraestrutura física, a pressão antrópica na área de estudo também se manifesta de forma severa na contaminação por resíduos sólidos. Durante as etapas de monitoramento, constatou-se uma acumulação densa de detritos concentrados predominantemente na zona de supramaré, avançando sobre a borda da vegetação de restinga analisada.

Figura 25: Imageamento vertical por drone evidenciando a distribuição espacial contínua de resíduos sólidos (setas vermelhas) ao longo da linha de transição entre a face praial e o cordão de vegetação.



Fonte: Autor (2026).

A tipologia dos materiais encontrados inclui uma grande quantidade de plásticos (garrafas PET e embalagens), latas de alumínio e restos de materiais de construção civil. Enquanto o registro ao nível do solo detalha o acúmulo desses resíduos misturados à matéria orgânica natural trazida pelas marés, a imagem aérea obtida por drone revela a distribuição contínua dessa 'zona de lixo' ao longo da linha de costa, evidenciando o impacto visual e ambiental na transição entre o calçadão urbanizado e o ambiente natural da praia.

5. DISCUSSÃO

5.1. Condicionamento Geomorfológico e Dinâmica Altimétrica da Face Praial

A integração de dados morfométricos obtidos por veículo aéreo não tripulado (VANT) e o monitoramento baseado em ciência cidadã demonstraram que a Praia da Ponta d'Areia possui uma dinâmica ambiental complexa, fortemente controlada pela presença do Espigão Costeiro. A análise tridimensional gerada no software Agisoft Metashape revelou que essa estrutura rígida atua como o principal elemento condicionante da morfologia local. Ao funcionar como uma barreira física artificial ao transporte sedimentar longitudinal, o espigão divide o ambiente em dois setores distintos: a zona de barlavento, caracterizada pelo acúmulo maciço e consequente alargamento da praia, e o setor de sotavento. Neste último, a zona de "sombra hidrodinâmica" reduz a energia das ondas incidentes, o que favoreceu o desenvolvimento de uma berma estável e de uma zona de supramaré alargada. Esse ambiente protegido propiciou as condições ecológicas necessárias para a fixação de dunas frontais e de vegetação pioneira de restinga, conferindo ao setor uma assinatura geomorfológica muito específica, corroborando as observações de Muehe (2006) e Albino *et al.* (2016) sobre os impactos de obras rígidas de defesa costeira na redistribuição de sedimentos e aprisionamento de fluxo ao longo do perfil praial brasileiro.

O comportamento geométrico dessa transição ambiental foi detalhado pelo perfil topográfico transversal de 340 metros. Nos primeiros 100 metros do transecto, a topografia suavemente ascendente reflete a estabilidade da zona de dunas e restinga, que atinge cota máxima de 2,1 metros. A partir dos 120 metros, o perfil assume um comportamento sinusoidal abrupto, exibindo duas cristas topográficas expressivas que alcançam picos de 2,6 e 3,7 metros. Esse arranjo morfológico peculiar funciona como um registro físico do empilhamento sedimentar induzido pela presença do enrocamento, que retém a areia transportada pela deriva litorânea e gera bermas de tempestade proeminentes, mecanismo de acreção artificial documentado por Souza (2009). Após essa crista principal, o perfil declina de forma acentuada e contínua em direção ao estirâncio, exibindo uma transição suave e dissipativa que culmina em cotas negativas de até -0,664 metros na zona de inframaré. Esse perfil alongado e dissipativo é típico de praias sob regime de macromarés, onde a grande amplitude de maré — associada ao cenário hidrodinâmico do litoral maranhense descrito por El-Robrini *et al.* (2006) e corroborado pelas tipologias macro-induzidas de Feitosa *et al.* (2019) — expõe uma vasta planície arenosa durante os eventos de baixamar de sizígia.

5.2. Assinatura Sedimentológica e Homogeneidade Textural

A modelagem tridimensional realizada sobre o mapa-base mostrou-se intrinsecamente associada à homogeneidade textural revelada pelas análises laboratoriais. A dominância absoluta da fração areia (entre 95,24% e 99,73%), a completa ausência de cascalho e os índices ínfimos de silte e argila (que mantiveram as amostras estritamente concentradas no Campo 9 do Diagrama Ternário de Shepard) refletem a alta energia e a eficiência do retrabalhamento hidrodinâmico costeiro. Conforme discutido pelo clássico estudo de Suguio (1973) e reforçado por Calliari *et al.* (2003), ambientes praias expostos a forte ação de ondas e correntes de maré passam por um processo contínuo de lavagem hidráulica (*winnowing*), o que explica a virtual eliminação das frações pelíticas finas (silte e argila) e a concentração preferencial de quartzosos.

5.3. Acurácia da Orthorretificação e Variação Espacial da Linha de Costa

A aplicação da metodologia CoastSnap expandiu a análise temporal da linha de costa por meio da ciência cidadã. A validação cruzada entre a retificação polinomial 2D do *CoastSnap* Toolbox e o ortomosaico 3D do *Metashape* revelou uma excelente convergência geométrica horizontal, indicando o acerto do método. Os baixos índices de erro quadrático médio residual (RMSE variando estritamente entre 0,30 e 0,34 pixels) comprovaram o ajuste refinado e subpixel dos alvos de controle, atestando a confiabilidade das coordenadas planas geradas e a ausência de distorções grosseiras na transposição das imagens oblíquas. Esses achados alinham-se aos protocolos nacionais de monitoramento costeiro por sensores de baixo custo apresentados por Albuquerque *et al.* (2021), os quais atestam que pontos de controle fixos no solo (GCPs) são capazes de calibrar e corrigir distorções de perspectiva de smartphones.

Embora a retificação simples ignore a altimetria do terreno e as distorções da lente da câmera, ela validou com sucesso o monitoramento horizontal da linha de costa. Ficou evidente o comportamento da faixa intertidal ao longo dos quatro cenários imageados: o estreitamento e avanço d'água em direção ao enrocamento na preamar (cenário a); o recuo gradativo na vazante (cenário b); a exposição máxima do estirâncio na baixamar (cenário c); e o início do empilhamento hidráulico na enchente (cenário d). Essa nítida variação espacial vetorizada reflete as oscilações hidrodinâmicas reais provocadas pelas forças astronômicas locais, demonstrando a eficácia de metodologias colaborativas e fotogrametria de baixo custo para o acompanhamento morfodinâmico em curto prazo no cenário brasileiro (LINS DE BARROS *et al.*, 2023).

5.4. Engajamento Social, Alcance Digital e Mobilização do CoastSnap-MA

O sucesso da técnica do *CoastSnap* esteve diretamente atrelado ao componente social do projeto, que contabilizou 912 imagens válidas provenientes de 1.198 voluntários. O engajamento da comunidade, contudo, revelou uma severa disparidade espacial: a Praia da Ponta d'Areia concentrou 90,2% das contribuições (823 imagens, incluindo registros noturnos), enquanto a Praia do Olho d'Água obteve apenas 9,8% do total, sem qualquer registro noturno. Essa diferença expressiva pode estar associada à infraestrutura urbana, acessibilidade, iluminação pública e ao fluxo diferencial de frequentadores entre os dois setores, fatores que Lins de Barros *et al.* (2023) apontam como determinantes para o sucesso de programas de ciência cidadã costeira no Brasil. Geograficamente, o projeto demonstrou um alcance nacional surpreendente, atraindo contribuições de 26 estados brasileiros e do Distrito Federal. Embora o Maranhão tenha liderado as participações com 52,1%, estados populosos e emissores de turistas como São Paulo (12,4%), Pará (7,3%) e Rio de Janeiro (4,5%) registraram volumes significativos de colaboração, consolidando o monitoramento fotográfico como ferramenta indutora de turismo sustentável e educação ambiental (SANTOS *et al.*, 2022).

A análise do alcance digital no Instagram corroborou essa capacidade de expansão do projeto, evidenciada pelo fato de que o público externo (não seguidores) dominou as visualizações, atingindo picos de até 98% nos meses de janeiro e fevereiro de 2026. A dinâmica das interações nas redes sociais revelou uma evolução temporal nítida, migrando de uma postura passiva (composta essencialmente por curtidas nos meses iniciais de 2024) para uma participação ativa em 2025 e 2026, marcada pelo aumento expressivo de comentários e compartilhamentos. O ápice desse engajamento e de visualizações ocorreu de forma atípica em janeiro de 2026, alcançando um pico de 12.516 visualizações. Esse fenômeno esteve diretamente atrelado à repercussão do ato de vandalismo que culminou na retirada física do totem do CoastSnap-MA da praia. A ampla divulgação desse evento negativo gerou uma forte mobilização e indignação social nas redes, evidenciando que as plataformas digitais atuam no Brasil contemporâneo tanto na difusão da ciência cidadã quanto como canais eficientes de denúncia, proteção patrimonial e mobilização coletiva em prol da preservação dos equipamentos públicos de pesquisa (ALBUQUERQUE *et al.*, 2021).

5.5. Interferências Antrópicas e Problemática Socioambiental Estrutural

Por fim, os dados integrados desta pesquisa iluminam a severa problemática socioambiental e estrutural que afeta a Orla da Ponta d'Areia, onde as interferências antrópicas aceleram a degradação da interface continente-oceano. A exposição contínua da infraestrutura urbana ao dinamismo hidrodinâmico das macromarés de sizígia resultou em processos erosivos severos, como o colapso e a subsidência do pavimento de blocos intertravados do calçadão. Esse afundamento do piso, gerado por subescavação e perda de sedimento subsuperficial logo acima do enrocamento protetor, compromete a segurança dos pedestres e atesta a falha local na contenção costeira, um reflexo claro do processo de urbanização acelerado e sem o devido recuo preditivo amplamente discutido por Souza (2009) ao mapear as vulnerabilidades das obras rígidas na costa setentrional brasileira.

Figura 26: Registro erosão no calçadão da Ponta d'Areia.



Fonte: Autor (2026).

A Figura 24 evidencia o colapso estrutural por abatimento no pavimento do calçadão, resultante do processo de erosão subsuperficial por lavagem do material de fundação (*piping*). Esse fenômeno ocorre devido à ação combinada da variação micromaré/macromaré e da drenagem pluvial, onde a percolação da água através da base do enrocamento de proteção solapa e carrega o sedimento fino que sustenta o piso intertravado. A remoção contínua da matriz sedimentar subsuperficial cria vazios sob a estrutura rígida, culminando na perda de sustentação e no subsequente desmoronamento da camada do calçadão, o que atesta a vulnerabilidade da infraestrutura urbana frente à dinâmica de retrabalhamento hidráulico no setor costeiro.

Somando-se à degradação física, a pressão antrópica manifesta-se na contaminação crônica por resíduos sólidos. O acúmulo denso de plásticos, latas e restos de construção civil concentra-se na zona de supramaré, avançando sobre a borda da vegetação de restinga. Conforme revelado pelas imagens do drone, essa "faixa de lixo" contínua expõe a grave insustentabilidade da ocupação urbana sobre os ecossistemas naturais da zona praial.

Figura 26: Acúmulo de resíduos sólidos urbanos misturados à matéria orgânica natural na zona de pós-praia.



Fonte: Autor (2026)

Como bem sintetizado por Lins de Barros *et al.* (2023), o lixo marinho associado à deterioração das obras de engenharia costeira não apenas compromete o valor paisagístico e turístico do local, mas também expõe a urgência de uma gestão costeira integrada, utilizando dados de monitoramento contínuo para mitigar os riscos socioambientais na região Metropolitana de São Luís (FEITOSA *et al.*, 2019).

6. CONCLUSÃO

O presente trabalho demonstrou a eficiência da integração de técnicas de sensoriamento remoto e monitoramento costeiro de base comunitária na caracterização morfodinâmica de praias sob regimes hidrodinâmicos extremos, tomando como objeto de estudo a Praia da Ponta d'Areia, em São Luís - MA. Através do emprego conjunto de levantamentos aerofotogramétricos por Drone RTK e do processamento digital de imagens pelo sistema CoastSnap, foi possível validar metodologias complementares de alta resolução espacial e temporal para o entendimento da dinâmica de macromarés.

A comparação metodológica entre os produtos evidenciou que, enquanto o ortomosaico gerado por Drone RTK oferece um mapeamento espacial contínuo e centimétrico de toda a praia em um momento específico, a retificação polinomial do CoastSnap (via Matlab) atua de forma complementar, fornecendo alta resolução temporal a baixíssimo custo. Constatou-se que a acurácia geométrica das imagens totêmicas é diretamente influenciada pela oscilação da maré: na vazante e baixamar (cenários das 09:40h, 10:20h e 11:00h), a exposição do estirâncio otimizou o alinhamento, atingindo excelentes índices estatísticos (RMSE entre 0,30 e 0,34 pixels). Os dados altimétricos calibrados pelo drone validaram essa dinâmica, caracterizando um perfil dissipativo que declina desde a crista a 3,7 m até a porção inferior do estirâncio a -0,664 m.

A homogeneidade granulométrica das areias quartzosas e o padrão de seleção fina observados na face praial atestam a eficiência dos processos de lavagem hidráulica operantes na Praia da Ponta d'Areia, os quais respondem diretamente à energia estuarina e oceanográfica do Golfão Maranhense. O perfil topográfico alongado e suavemente inclinado confirma o comportamento tipicamente dissipativo desse ambiente macromaré, cujo arranjo geométrico é localmente modificado pela presença do Espigão Costeiro no setor de sotavento.

O projeto CoastSnap-MA consolidou-se como uma ferramenta científica e social de vanguarda no cenário nacional. Impulsionada pelas características singulares da Ponta d'Areia que combinam forte apelo turístico, intensa urbanização e ampla visibilidade paisagística, esta estação registrou a maior participação comunitária do Brasil no programa CoastSnap, posicionando-se como a líder nacional absoluta em volume de recebimento de fotografias, superando engajamento e de bancos de dados de todas as outras capitais litorâneas monitoradas pelo projeto.

Contudo, a aplicação do método revelou limitações geométricas intrínsecas ao arranjo espacial da estação. A altura de fixação do totem e o ângulo oblíquo em que o suporte foi posicionado impuseram desafios técnicos rigorosos para o algoritmo de ortorretificação. Devido à linha de visada mais horizontalizada em relação à face praial, ocorre um efeito acentuado de compressão de perspectiva à medida que a distância do alvo aumenta. Além disso, nos momentos de pico da preamar (maré alta de sizígia), esse ângulo visual desfavorável faz com que os blocos de rocha do enrocamento atuem como obstáculos físicos, mascarando a real interface entre a água e a areia e impedindo uma delimitação precisa da linha de costa nesses cenários específicos.

Apesar dessas restrições geométricas na maré alta, a acurácia submétrica obtida nos estágios de maré intermediária e baixamar valida o uso da ciência cidadã como método complementar viável, economicamente sustentável e de alta frequência temporal. Os episódios de altas no Instagram, incluindo a expressiva mobilização pública após o ato de vandalismo contra o totem em janeiro de 2026, demonstram que o engajamento virtual atua não apenas no suporte à coleta de dados, mas como um poderoso canal de conscientização, denúncia socioambiental e governança participativa para a gestão integrada da zona costeira de São Luís.

Por fim, recomenda-se para estudos futuros a realização de testes com o reposicionamento do totem em uma cota altimétrica ligeiramente superior, buscando um ângulo verticalizado que minimize a compressão de perspectiva. Ademais, incentiva-se a manutenção contínua das campanhas de divulgação nas redes sociais e em escolas locais, garantindo a sustentabilidade temporal do banco de dados e consolidando a cultura de preservação patrimonial e monitoramento participativo na Ilha de São Luís

7. REFERÊNCIAS

- AGISOFT LLC. Agisoft Metashape Professional User Manual. Version 2.2. St. Petersburg, Russia: Agisoft LLC, 2025.
- ALBINO, J. et al. Classificação das praias arenosas do litoral do estado do Espírito Santo, Brasil. *Revista de Gestão Costeira Integrada*, v. 16, n. 2, p. 123-140, 2016.
- ALBUQUERQUE, M. G. et al. Monitoramento da linha de costa através de imagens de satélite de alta resolução e UAV. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 22, n. 3, p. 512-528, 2021.
- BLOTT, S. J.; PYE, K. GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 26, n. 11, p. 1237-1248, 2001.
- BONNEY, R. et al. Public Participation in Scientific Research: Defining the Field and Assessing Its Potential for Informal Science Education. Washington, D.C.: Center for Advancement of Informal Science Education (CAISE), 2009.
- BRASIL. Marinha do Brasil. Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN). Tábuas das Marés. Niterói: DHN. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/dhn/>. Acesso em: 2026.
- BRODIE, K. L. et al. Coastal change monitoring using UAV photogrammetry. *Coastal Engineering*, v. 147, p. 1–15, 2019.
- BRUUN, P. The Bruun Rule of erosion by sea-level rise: a discussion on a large-scale two-dimensional concept. *Coastal Engineering*, v. 12, n. 1, p. 79-89, 1988.
- BUSCH, J. A. et al. Citizen science for coastal monitoring: benefits and challenges. *Ocean & Coastal Management*, v. 134, p. 48–55, 2016.
- CALLIARI, L. J. et al. Praias da costa norte brasileira. In: PROXIMA, C. (Org.). *Praias Arenosas do Litoral Brasileiro*. São Paulo: UNESP, 2003. p. 112-135.
- CONRAD, C. C.; HILCHEY, K. G. A review of citizen science and community-based environmental monitoring. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 176, p. 273–291, 2011.
- CORRÊA, I. C. S. Morfodinâmica costeira e a evolução das praias arenosas. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2003.
- DIAS, J. M. A. A evolução costeira e os processos de erosão praial. Lisboa: Instituto Hidrográfico, 2004.
- EL-ROBRINI, M. et al. Pará. In: MUEHE, D. (Org.). *Erosão e progradação do litoral brasileiro*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2006. p. 41-86.

- FEITOSA, A. C. et al. Dinâmica geomorfológica e impactos ambientais no litoral do Maranhão. *Revista de Geografia (UFPE)*, v. 36, n. 2, p. 204-221, 2019.
- FOLK, R. L. *Petrology of Sedimentary Rocks*. Austin, Texas: Hemphill's Bookstore, 1968.
- FOLK, R. L.; WARD, W. C. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 27, n. 1, p. 3-26, 1957.
- GOMES, N. M. Paleomangues: indicadores naturais de erosão costeira de longo termo na Ilha do Maranhão. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geografia) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2015.
- GONÇALVES, J. A.; HENRIQUES, R. UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas. *Journal of Coastal Research*, v. 31, n. 6, p. 1437-1447, 2015.
- GOOGLE LLC. Google Earth Pro. Disponível em: <https://earth.google.com/>. Acesso em: 2026.
- HARLEY, M. D. et al. Shoreline change mapping using crowd-sourced smartphone images. *Coastal Engineering*, v. 150, p. 175–189, 2019.
- HARLEY, M. D.; KINSELA, M. CoastSnap: A global citizen science program to monitor changing coastlines. *Continental Shelf Research*, v. 246, p. 104818, 2022.
- HERRING, J. R. et al. Morphodynamics of a macrotidal beach. *Marine Geology*, v. 50, p. 97–127, 1982.
- HORIBA. Partica LA-350 Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer: Instruction Manual. Kyoto: Horiba Ltd., 2020.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas – SIRGAS2000. Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/>. Acesso em: 2026.
- ISO 13320:2020. Particle size analysis — Laser diffraction methods. Genebra: International Organization for Standardization, 2020.
- JACOBI, C. M. A importância da ciência cidadã na conservação ambiental. *Natureza & Conservação*, v. 4, n. 1, p. 12-23, 2006.
- KOMAR, P. D. *Beach processes and sedimentation*. 2. ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1998.
- KRUMBEIN, W. C. Size frequency distributions of sediments. *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 4, n. 2, p. 65-77, 1934.

LEISNER, M. et al. UAV remote sensing applications in beach-cliff system monitoring of morphodynamic processes. *Revista de Monitoramento Costeiro e Ambiental*, v. 4, n. 1, artigo e23025, 2024.

LIMA, L. G. et al. Análise morfodinâmica de praias macromareais do norte do Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 44, n. 3, p. 445-458, 2014.

LIMA, L. G. de et al. Morfodinâmica da Praia da Ponta da Areia: considerações sobre a construção de um espigão costeiro em ambiente de macromaré. *Geociências*, v. 41, n. 2, p. 503-515, 2022.

LIMA, L. G. et al. Caracterização sedimentar das praias areias da Ilha do Maranhão. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 17, n. 3, p. 1672–1696, 2024.

LINS DE BARROS, F. M. et al. Contribuições de monitoramentos participativos de praias arenosas para a gestão costeira integrada a partir do Projeto Mar à Vista (UFRJ) e da metodologia CoastSnap. *Costas*, v. 4, n. 1, p. 117–148, 2023.

LIPPMANN, T. C.; HOLMAN, R. A. Quantification of sand bar morphology: a video technique based on wave dissipation. *Journal of Geophysical Research*, v. 94, n. C1, p. 995–1011, 1989.

MANCINI, F. et al. Using Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for high-resolution reconstruction of topography: The structure from motion approach. *Sensors*, v. 13, n. 12, p. 16715-16737, 2013.

MARQUES, M. A. Valorização e dinâmica socioespacial do espaço urbano: olhares sobre o espigão costeiro no bairro Ponta d'Areia em São Luís (MA). Monografia (Especialização em Geografia) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2015.

MASSELINK, G.; HUGHES, M. *Introduction to coastal processes and geomorphology*. 2. ed. London: Hodder Education, 2014.

MASSELINK, G.; SHORT, A. D. The effect of tidal range on beach morphodynamics and morphology: a conceptual model. *Journal of Coastal Research*, v. 9, n. 3, p. 785-800, 1993.

MASSELINK, G.; TURNER, I. L. Morphodynamics of rip channels on a barred beach. *Continental Shelf Research*, v. 19, n. 10, p. 1277-1298, 1999.

MENESES, M. S. Aplicações de Aeronaves Não Tripuladas (RPA) no monitoramento geomorfológico costeiro. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2021.

MONICO, J. F. G. *Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações*. 2. ed. São Paulo: UNESP, 2008.

- MUEHE, D. Erosão costeira: tendência ou eventos extremos? Rio de Janeiro: s.n., 2004.
- MUEHE, D. Geografia costeira: dinâmica e gestão. 2. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2018.
- MUEHE, D. Geomorphology of the Brazilian Coast. Rio de Janeiro: Editora do Autor, 2020.
- NEVES, R. C. et al. Sedimentary transport in coastal bays: case study of Vitória and Espírito Santo Bays – ES – Brazil. *Brazilian Journal of Geophysics*, v. 30, n. 2, p. 181–189, 2012.
- PEREIRA, D. M. Variabilidade textural e morfodinâmica das praias da Ilha de São Luís, MA. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2018.
- QGIS DEVELOPMENT TEAM. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. Disponível em: <https://qgis.org>. Acesso em: 2026.
- RADEMANN, L. K. et al. Influência dos Ground Control Points (GCPs) na acurácia de produtos cartográficos gerados por veículos aéreos não tripulados (VANTs) em área de variação altimétrica. *Revista Geografia Acadêmica*, v. 18, n. 1, p. 24–38, 2024.
- RAMOS, R. J. P. Monitoramento morfodinâmico integrado e ciência cidadã em praias de macromaré em São Luís-MA. 2026. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2026.
- ROTNICKA, J. et al. Accuracy of the UAV-Based DEM of Beach–Foredune Topography in Relation to Selected Morphometric Variables, Land Cover, and Multitemporal Sediment Budget. *Estuaries and Coasts*, v. 43, p. 1939–1955, 2020.
- SANTOS, A. C. G. et al. Dinâmica da paisagem: o caso da Praia Ponta d’Areia em São Luís – MA. In: 9º SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 2012, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: UGB, 2012.
- SANTOS, A. C. et al. Caracterização sedimentológica e morfodinâmica das praias do litoral ocidental maranhense. *Geochimica Brasilica*, v. 36, n. 1, p. 45-59, 2022.
- SANTOS, A. F. dos. Análise multitemporal da linha de costa e indicadores de erosão na praia da Ponta D’Areia, ilha do Maranhão: diagnóstico dos impactos de obras costeiras. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2024.
- SEEBER, G. Satellite Geodesy: Foundations, Methods, and Applications. 2. ed. Berlim: Walter de Gruyter, 2003.
- SHEPARD, F. P. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios. *Journal of Sedimentary*

Petrology, v. 24, n. 3, p. 151-158, 1954.

SHORT, A. D. Beach and shoreface morphodynamics. Chichester: Wiley, 1999.

SILVA, I. R. Processos costeiros e dinâmica sedimentar de praias arenosas. Salvador: UFBA, 2012.

SOUSA, A. S. S.; CORRÊA, M. C. C. Mudanças paisagísticas e na dinâmica de sedimentos resultantes da construção do espigão costeiro na Praia Ponta d'Areia, São Luís-MA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE OCEANOGRAFIA, 2014, Vitória. Anais... Vitória: AOCEANO, 2014.

SOUZA, C. R. de G. A erosão costeira e os desafios da gestão costeira no Brasil. Revista da Gestão Costeira Integrada, v. 9, n. 1, p. 17-37, 2009.

SUGUIO, K. Introdução à Sedimentologia. São Paulo: Edgard Blücher/EDUSP, 1973.

SUGUIO, K. Geologia sedimentar. São Paulo: Edgard Blücher, 2003.

TAKASU, T. RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning. Tóquio, 2013. Disponível em: <http://www.rtklib.com/>. Acesso em: 2026.

TURNER, I. L. et al. Coastal imaging applications for beach monitoring and management. Coastal Engineering, v. 112, p. 111-125, 2016.

WENTWORTH, C. K. A scale of grade and class terms for clastic sediments. The Journal of Geology, v. 30, n. 5, p. 377-392, 1922.

WESTOBY, M. J. et al. Structure-from-Motion photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. Geomorphology, v. 179, p. 300-314, 2012.

WRIGHT, L. D. et al. Dynamics of a high-energy dissipative surf zone. Marine Geology, v. 48, n. 1-2, p. 47-60, 1982.

WRIGHT, L. D.; SHORT, A. D. Morphodynamic variability of surf zones and beaches. Marine Geology, v. 56, p. 93-118, 1984.

.