

MORFODINÂMICA DA PRAIA DA PONTA DA AREIA: CONSIDERAÇÕES SOBRE A CONSTRUÇÃO DE UM ESPIGÃO COSTEIRO EM AMBIENTE DE MACROMARÉ

MORPHODYNAMICS OF PONTA DA AREIA BEACH: CONSIDERATIONS ON THE CONSTRUCTION OF A COASTAL GROIN IN A MACROTIDAL ENVIRONMENT

Leonardo Gonçalves de LIMA¹, Matheus Seguints FERREIRA², Bruno Jansen FRANCO³, Claudia Klose PARISE¹, Jorge Hamilton Souza dos SANTOS¹

¹Universidade Federal do Maranhão. Departamento de Geociências. Avenida dos Portugueses, 1966 - Vila Bacanga, São Luís - MA. E-mails: paleonardo_7@hotmail.com; claudiakparise@gmail.com; notlimah210@yahoo.com.br

²Universidade Federal do Maranhão - Programa de Graduação em Oceanografia e Limnologia. E-mail: matheus.seguins@hotmail.com

³Universidade do Estado do Rio de Janeiro - Programa de Pós-Graduação em Oceanografia. Avenida Marechal Rondon, 381, São Francisco Xavier, Rio de Janeiro - RJ. E-mail: brunno_jfranco@hotmail.com

Introdução
Métodos
Resultados
Discussões
Conclusão
Referências

RESUMO - A praia da Ponta da Areia, localizada na orla oceânica do município de São Luís - Maranhão, é dominada por um regime de macro maré, cuja altura alcança 6,5 m (amplitude de 3,25 m) e ondas de 1,5 m. Esta praia, cujo nome deve-se a sua origem e evolução sobre um esporão arenoso (*spit*) que se prolonga na direção W-SW carregado pela deriva litorânea de sedimentos, está sujeita, como tantas outras praias no litoral norte e nordeste brasileiro, a processos erosivos costeiros. Em 2011 teve início, e em 2014 o término da construção de um espigão costeiro na praia da Ponta da Areia com o objetivo de conter a erosão costeira. O presente estudo é uma avaliação do comportamento morfodinâmico da praia pós-espigão durante 12 meses nos anos de 2015 e 2016. Para tal foram monitorados mensalmente quatro transectos através da realização de perfis topográficos nos compartimentos litorâneos de entorno do espigão (Setores 1, 2, 3 e 4). Os resultados mostraram que a maior retenção de sedimentos (acrecção) ocorreu no setor 3 imediatamente a montante do espigão. Neste setor a linha de costa encontra-se progredante, ou seja, a cada ciclo de maré a praia avança em direção ao centro da Baía de São Marcos. Os setores oceânicos que se encontram mais distantes da zona de atuação do espigão alternaram-se sazonalmente, demonstrando ainda certa instabilidade do litoral.

Palavras-chave: Barreira costeira. Perfis praias. Erosão e acreção.

ABSTRACT - The Ponta da Areia beach, located on the oceanic shore of São Luís - Maranhão, is dominated by a macrotidal regime whose height reaches 6.5 m and waves of 1.5 m. This beach, whose name is due to its origin and evolution on a sandy spit that extends in the W-SW direction carried by the coastal drift of sediments, is subject, like so many other beaches on the northern and northeast Brazilian coast, to erosive processes. In 2011 the construction of a coastal groin began in Ponta da Areia beach with the objective of containing coastal erosion in that location. The present study is an evaluation of the post-groin beach morphodynamic behavior during 12 months in the years 2015 and 2016. For this purpose, four transects were monitored monthly (from January to December) through the performance of topographic profiles in the main coastal compartments surrounding the spit (Sectors 1, 2, 3 and 4). The results showed that the greatest sediment retention (accretion) occurred in Sector 3 immediately upstream of the spit. In this sector, the coastline is prograding, that is, at each tidal cycle the beach advances towards the center of São Marcos Bay. The sectors that are farthest from the action area of spit have alternated between periods of accretion and erosion, still demonstrating a certain instability of the coast.

Keywords: Coastal barrier. Beach profiles. Erosion and accretion.

INTRODUÇÃO

A evolução costeira é o produto das adaptações morfodinâmicas em resposta a variabilidade de condições externas (*e.g.* nível relativo do mar, clima de ondas, meteorologia, etc.), promovidas pelo ajuste mútuo da topografia e hidrodinâmica, envolvendo o transporte sedimentar (Wright & Thom, 1977). Essa interação morfodinâmica reflete ao longo do tempo diferentes padrões de estabilidade e mobilidade das praias resultando em ciclos sazonais de deposição e erosão (Carter

& Woodroffe 1995). A morfodinâmica praias tem despertado o interesse de inúmeros pesquisadores na busca de modelos conceituais de larga aplicação onde destacam-se os trabalhos pioneiros de Wright et al. (1979a, b; 1982), Short (1981), Wright et al. (1982) e Wright & Short, (1984), realizados na costa australiana. No entanto, as marés podem assumir um amplo controle sobre a morfodinâmica costeira, não tão bem documentado como a influência do clima de ondas sobre a morfologia

(Masselink & Short, 1993).

Mudanças na morfodinâmica praial podem resultar de intervenções humanas, em virtude da ocupação desordenada do pós-praia, obras de engenharia para o controle da erosão, represamento de rios, dragagem e, sobretudo, pela ausência de uma política adequada para o manejo de áreas costeiras (Carneiro et al., 2008). As construções servem como referencial da erosão costeira quando são destruídas, no entanto, não necessariamente indicam condições de longo termo desta erosão, indicam apenas que eventos erosivos pontuais podem ser reconhecidos. Um completo entendimento da zona costeira decorre da avaliação conjunta de fatores naturais e antrópicos, os quais são por sua vez suscetíveis a mudanças espaços-temporais cíclicas que impedem uma avaliação em curto prazo.

Estas mudanças se estendem à margem equatorial brasileira que apresenta feições geomorfológicas características de costa dominada por macromarés, interagindo com estuários, deltas, planícies de maré, ilhas barreiras, e praias entre outras formações (Souza Filho, 1995). Os agentes físicos que atuaram durante a Transgressão Marinha Pós-Glacial (TMP) ampliam ou minimizam a exposição e orientação da linha de costa em resposta a diferentes compartimentos deposicionais que se instalaram ao longo da margem continental norte brasileira. Os sistemas praias adjacentes destacam-se pela antepraia (*shoreface*) que inclui a zona de arrebentação com ondas de alta energia, que acabam por transportar os sedimentos de maneira perpendicular ou longitudinal, e assim modificam a morfologia do litoral através de processos de erosão e/ou acreção (Hoefel, 1998; Calliari & Klein, 1993; Calliari et al., 2003).

Na Ilha do Maranhão as praias oceânicas integram sistemas de barreiras arenosas costeiras que podem ser divididas em dois morfotipos: as barreiras de praias anexadas (*mainland beach barrier*), que se caracterizam por ter uma topografia antecedente (falésias da Formação Itapecuru, Albiano da Bacia do Parnaíba) com gradiente íngreme onde ocorre a perda contínua de areia na costa erodida (Roy et al., 1994); e as barreiras de esporões arenosos ligadas a cabeços de Promontórios (*headland spit barrier*) que se caracterizam por um sistema laguna-barreira ancorado em afloramentos (falésias) da Formação Itapecuru (Branner, 1902; Campbell, 1949; Bigarella, 1955).

Este último morfotipo desenvolve-se onde

existe brusca variação de orientação da linha de costa, geralmente onde topografia antecedente é mais resistente a erosão marinha. Nestes pontos proeminentes da costa ancora-se uma barreira arenosa do tipo esporão, suprida de um amplo transporte de sedimentos via deriva litorânea, interrompido somente pelo efeito espigão hidráulico, em virtude de elevados prismas de maré nas desembocaduras fluviais. Esta região costeira está sob influência de um regime de macromaré semi-diurna, com alturas de até 6,5 m (DHN, 2004) e recebe ventos constantes vindos de NE, os quais por sua vez, resultam em ondas de até 1,5 m de altura. Eventos extremos são frequentes no verão e resultam de ciclones extratropicais originados no Hemisfério Norte (Quadros, 2016).

A praia da Ponta da Areia desenvolve-se sobre um esporão arenoso de 2,5 km de extensão em direção W-SW, que se inicia nas falésias da Ponta do Farol onde ocorre a Sequência Itapecuru Superior, e avança até alcançar a desembocadura do estuário do rio Anil (Figura 1). Duas intervenções antrópicas alteraram o equilíbrio do balanço sedimentar da praia da Ponta da Areia: 1- a implantação da Barragem do Bacanga, que reduziu significativamente o prisma de maré do estuário do rio Anil e bloqueou o prisma de maré do rio Bacanga (Figura 1); 2- o aprisionamento do Igarapé da Jansen pelo aterro que originou a Lagoa da Jansen. Estas intervenções ocasionaram a drástica redução do prisma de maré do estuário do rio Anil, com conseqüente desaparecimento do efeito de espigão hidráulico, formando um amplo delta de maré vazante (Banco da Minerva) na foz do estuário, às custas de uma redução da largura da praia da Ponta da Areia, refletindo efeitos erosivos no pós-praia (Albuquerque, 2018).

Assim, entre 2011 e 2014 foi construído um espigão rochoso no extremo do esporão arenoso da Ponta da Areia, transversal à linha de costa, totalizando em 560 m de enrocamentos com a finalidade de ampliar a praia e aprofundar a foz estuarina pelo déficit de sedimentos a jusante do espigão. O presente estudo é uma análise entre 2015 e 2016 do comportamento morfodinâmico a que a praia da Ponta da Areia foi submetida após a construção de um espigão costeiro. Acredita-se que a instabilidade costeira ainda se mantém na referida praia, mesmo após a implantação da referida obra de engenharia rígida.

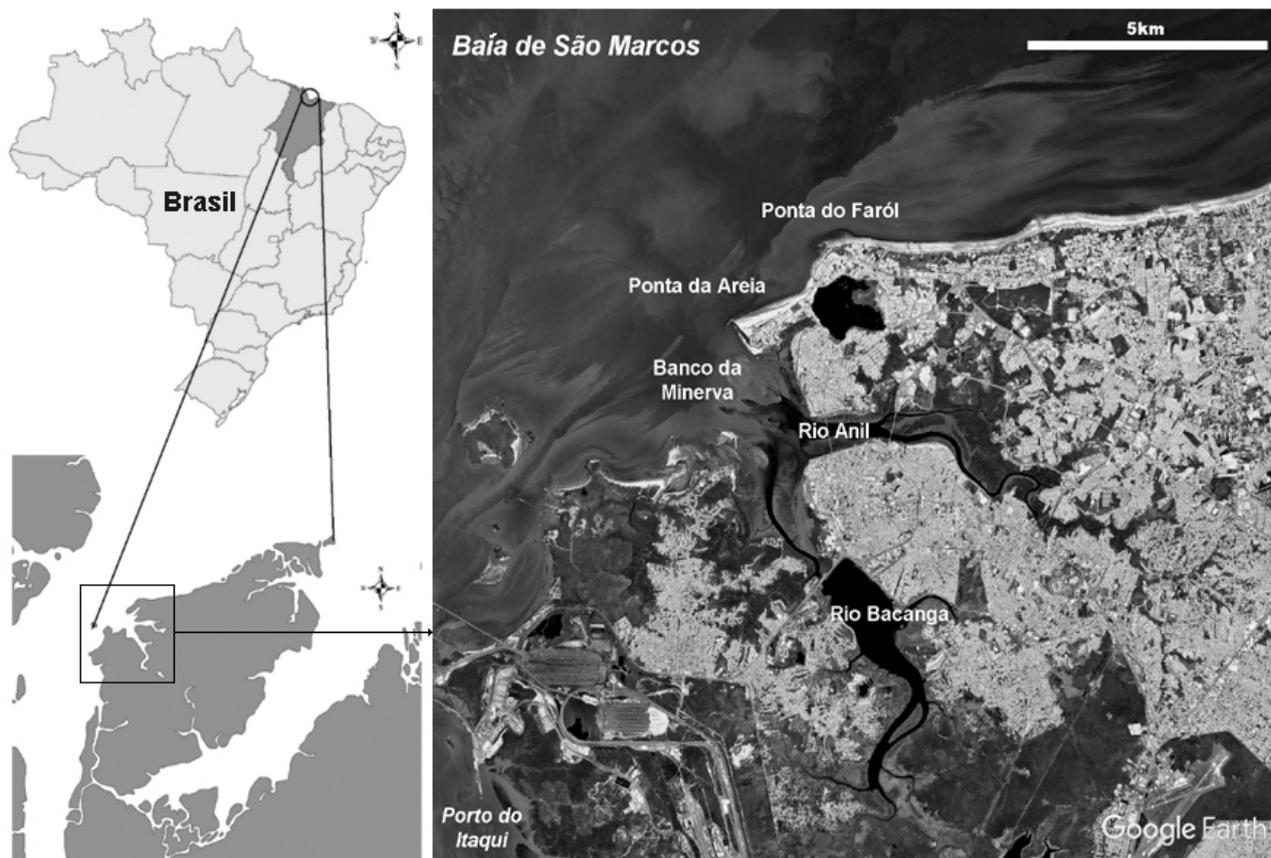


Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo.

MÉTODOS

A praia da Ponta da Areia está localizada na porção oeste da Ilha do Maranhão (Figura 1), sendo banhada pela Baía de São Marcos, que por sua vez, está inserida no Golfão Maranhense. O Golfão é caracterizado por um regime de macromarés, onde as correntes podem atingir uma velocidade de 7,5 m/s devido ao formato de funil desta grande ria.

A praia da Ponta da Areia é uma praia arenosa, desenvolvida sobre a face oceânica de esporão arenoso ancorado a rochas sedimentares da Formação Itapecuru. Seu prisma praiar pode alcançar 400 metros (entre a duna frontal e a linha d'água), em virtude de uma amplitude de maré de 3,5 metros em períodos de sizígia.

A praia foi compartimentada em quatro setores buscando-se uma hierarquização dos processos responsáveis pela sua geomorfologia: Setor 1 – situado na base do esporão arenoso, próximo à área de atuação de um espigão natural de rochas lateríticas; Setor 2 – situado em frente a um enrocamento (*seawall*) paralelo a orla da praia; Setor 3 – situado imediatamente a montante do espigão rochoso; Setor 4 – Situado a jusante do espigão rochoso. Em cada setor foi desenvolvido um transecto topográfico perpendicular a orientação

da linha de costa, segundo método descrito por Birkemeier (1981).

Este método, utilizando-se de um nível ótico, possibilitou o monitoramento dos quatro perfis em um único ciclo de maré baixa, totalizando 2 horas e 30 min de coleta de pontos. Posteriormente, as cotas dos perfis foram referenciadas segundo um nível de referência (IBGE) na porção urbanizada da praia e plotados em software Excel. As declividades das praias foram calculadas a partir das máximas e mínimas cotas topográficas da face praiar.

O monitoramento topográfico dos perfis foi mensal entre abril de 2015 e abril de 2016, sempre em marés baixa de sizígia. Os parâmetros morfodinâmicos (granulometria dos sedimentos na face praiar, altura e período de ondas) foram medidos em abril.

Para estes dois últimos parâmetros foram utilizados um cronômetro e uma régua instalada na zona de arrebentação e medidos tanto em maré alta como baixa, durante 30 minutos sendo expressos pela média. As amostras sedimentares foram coletadas no estirâncio de cada setor, sendo então submetidas ao peneiramento na resolução de $\frac{1}{2}$ phi (Suguio, 1973).

Os resultados da granulometria foram processados segundo a análise estatística descrita por Folk & Ward (1957) no programa Sysgran 3.0@ (Camargo, 2006). A caracterização dos estágios morfodinâmicos em cada transecto seguiu a metodologia proposta por Masselink & Short (1993), a qual por sua vez utiliza o parâmetro adimensional Ω (equação 1), (Wright & Short, 1984) integrando-se ao parâmetro RTR (*Relative Tide Range Parameter*) (equação 2). Exceção ao setor 4 por encontrar-se num setor de canal, e não numa praia.

$$\Omega = \frac{H_b}{W_s} \cdot T \quad (1)$$

$$RTR = \frac{TR}{H_b} \quad (2)$$

Onde:

H_b = altura significativa da onda na arrebentação;
 W_s = velocidade média de decantação dos sedimentos;
 T = período médio das ondas;
 TR = variação média da maré de sizígia.

O balanço sedimentar dos setores foi calculado utilizando-se do volume dos perfis praias em m^3/m , ou seja, cada metro do perfil foi quantificado para unidade de volume.

Os compartimentos da face litorânea da praia da Ponta da Areia foram hierarquizados segundo Wright et al. (1982) da seguinte forma: zonas de supramaré, intermaré e inframaré. O compartimento mais interno é composto por um campo de dunas e marca o início da faixa de areia da praia, depois, na zona de supramaré, região sem a incidência da maré, geralmente a frente da duna frontal até a zona de deposição de lixo.

Entre os níveis de maré alta de sizígia (MAS) e maré alta de quadratura (MAQ) está a zona de intermaré superior (ZIS), mais abaixo da MAQ e antes da maré baixa de quadratura (MBQ) está a zona de intermaré média (ZIM), entre a MQB e a maré baixa de sizígia (MBS) localiza-se a zona de intermaré inferior (ZII) e abaixo da maré baixa de sizígia (MBS) está a zona de inframaré (ZI) (Figura 2).

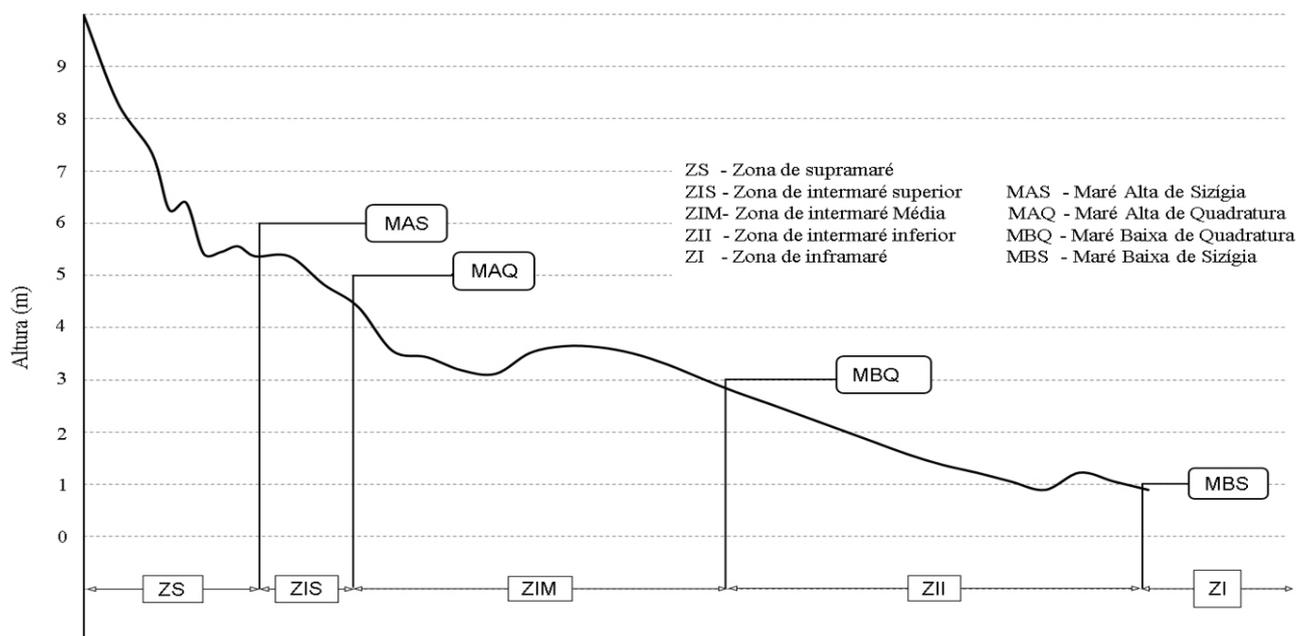


Figura 2 - Perfil geral das zonas supramaré, intermaré e inframaré, adaptado de Wright et al. (1982).

RESULTADOS

O setor 1, localizado a montante do espigão da praia da Ponta da Areia, corresponde ao perfil mais distante deste espigão costeiro monitorado (Figura 3). Dentre todos os perfis praias realizados, o setor 1 foi de maior declividade e por isso não foram encontradas feições de calhas de maré ou bancos (Figura 4). Não há neste setor um predomínio de erosão nem de deposição, o que se observou foi a alternância entre erosão e depo-

sição. Os dados de onda e sedimentos encontram-se nas tabelas 1 e 2.

O balanço sedimentar do setor 1 resultou em $-194 m^3/m$, o que corresponde a 101,7 toneladas de areia fina removida ao longo do período monitorado ($1m^3$ de areia fina = 1300 kg). A maior variação de volume sedimentar no setor 1 ocorreu entre os meses de janeiro e fevereiro com $-376 m^3/m$ (Figura 5).



Figura 3 - Mapa amostral dos perfis topográficos e setores monitorados.

Tabela 1 - Parâmetros medidos e calculados para os setores 1, 2 e 3; Altura significativa de onda (H_s), Período de ondas (T), Parâmetro Relativo da Maré (RTR) e Ômega (Ω).

| Setor | Maré | H_s (cm) | T (s) | RTR | Ω |
|-------|-------|------------|---------|------|----------|
| 1 | alta | 50 | 5 | 7 | 3,3 |
| | baixa | 45 | 6 | 7,78 | 2,5 |
| 2 | alta | 55 | 6 | 6,36 | 3 |
| | baixa | 43 | 6 | 8,14 | 2,3 |
| 3 | alta | 50 | 7 | 7 | 2,5 |
| | baixa | 45 | 5 | 7,78 | 3,1 |

Tabela 2 - Granulometria das amostras coletadas no estirâncio dos setores 1, 2 e 3.

| Setor | média (ϕ) | classificação | seleção | assimetria | curtose |
|-------|------------------|---------------|---------------------------|------------------|-------------|
| 1 | 2,3 | areia fina | bem selecionado | Aprox. Simétrica | Platicútica |
| 2 | 2,6 | areia fina | bem selecionado | Aprox. Simétrica | Mesocúrtica |
| 3 | 2,8 | areia fina | moderadamente selecionada | Negativa | Platicútica |

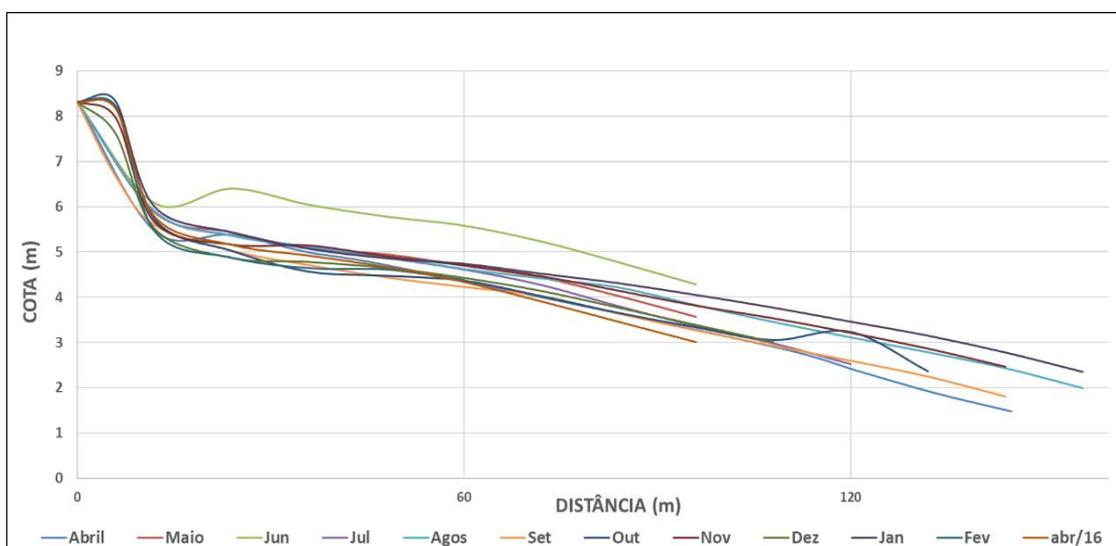


Figura 4 - Perfis praias realizados no setor 1.

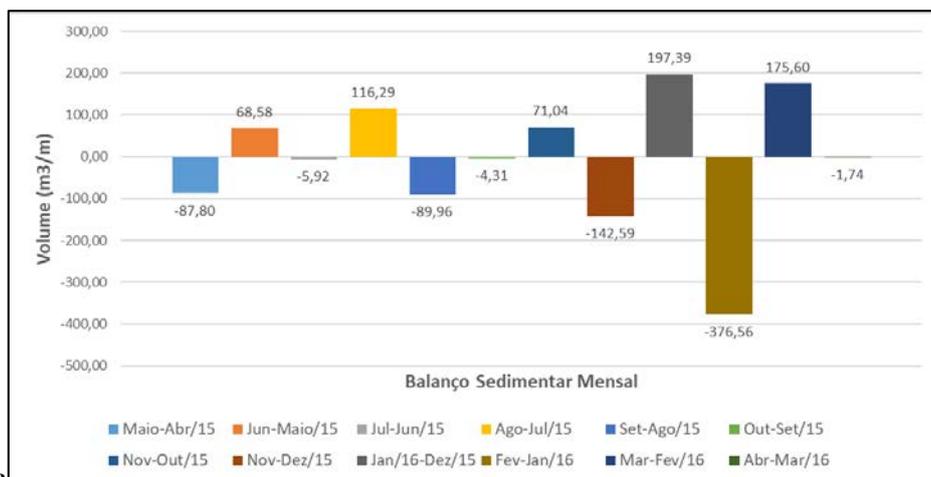


Figura 5 - Variação mensal de volume (em m³/m) entre os perfis realizados no Setor 1.

O setor 2 localiza-se na porção central e mais retilínea da praia da Ponta da Areia onde existe um enrocamento (*seawall*) paralelo à linha de costa (Figura 6). O monitoramento topográfico evidenciou que este setor exibe um pronunciado sistema de banco e calha, o que resulta em grande mobilidade no prisma praial. A ocorrência de calhas limita-se à porção superior do perfil, onde elas alcançam 1,5 m de desnível em relação à

continuidade do perfil topográfico.

Nos meses de agosto e setembro este sistema não se fez presente, resultando numa baixa mobilidade do prisma praial (Figura 7). O parâmetro Ω para o setor 2 foi em média de 3,0 para maré alta e 2,3 para a maré baixa, e o RTR de 6,3 e 8,1 respectivamente (Tabela 1), conferindo-o o estágio de *Low Tide Bar/Rip* na maré alta e *Ultra-Dissipative* na maré baixa.

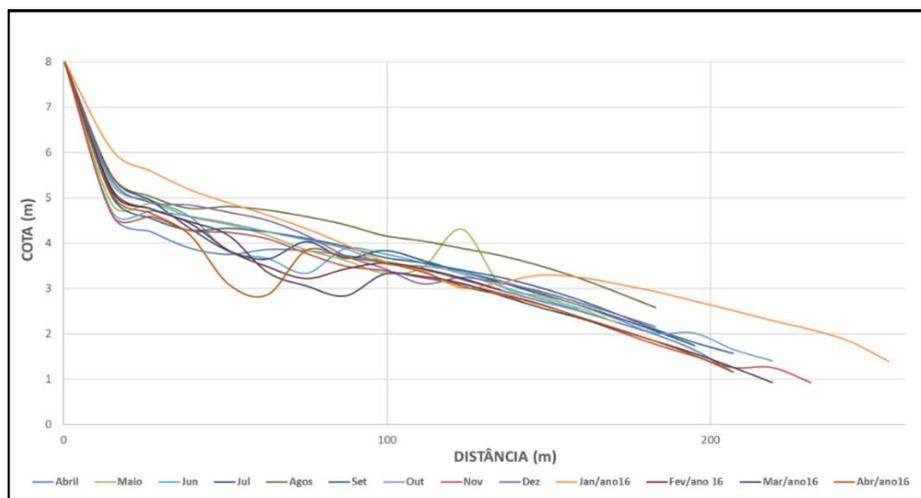


Figura 6 - Perfis praias realizados no setor 2.

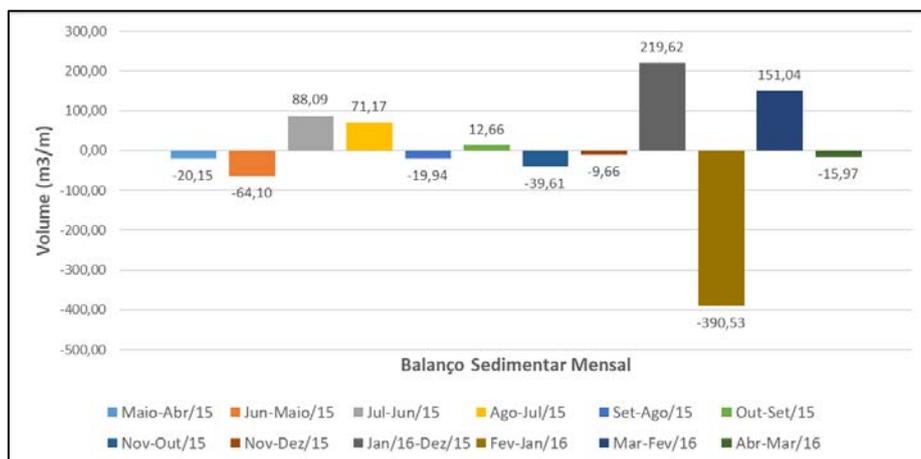


Figura 7 - Variação mensal de volume (em m³/m) entre os perfis realizados no Setor 2.

As maiores variações volumétricas no setor 2 estão relacionadas ao período de verão onde se alternam os maiores saldos positivos e maiores déficits em função da mudança entre o período seco e chuvoso. O balanço sedimentar resultante do período de monitoramento no setor 2 foi de -17,4 m³/m, correspondendo a 22,6 toneladas de areia fina (1m³ de areia fina = 1300kg)

O setor 3 é localizado imediatamente a montante do espigão rochoso. É o compartimento mais largo e com maior prisma praiial (380 m) da praia da Ponta da Areia. Este setor é predominantemente progradacional com um campo de dunas parabólicas e frontais de 120 m em sentido transversal à praia. Estas características possibilitam a formação de dunas embrionárias que consequentemente tornam-se frontais (Figura 8). Calhas de maré desenvolvem-se na face praiial em confluência com sangradouros (Pereira da

Silva et al., 2003), que se originam em *blowouts* localizados.

A sequência progradacional dos perfis é marcada pela baixa mobilidade junto ao campo de dunas tornando-se mais móvel à medida que avança à zona intermaré (Figura 9). Os valores de Ω obtidos para o setor 3 foram em média de 2,5 na maré alta e de 3,1 na maré baixa, enquanto o RTR foi de 7 na maré alta e 7,7 na maré baixa. Segundo a classificação proposta por Masselink & Short (1993) esse perfil variou do estágio *Low Tide Bar/Rip* na maré alta para o estágio *Ultra-Dissipative* na maré baixa. O setor 3 exibiu ao longo de seu monitoramento uma alternância entre sequências pronunciadas de erosão e sequências também pronunciadas de acreção (Figura 10). O balanço sedimentar no setor 3 foi de -65,5 m³/m o que corresponde a 85 toneladas de areia fina.



Figura 8 - Dunas embrionárias em formação na linha de preamar de sizígia (zona de deposição de lixo) na face praiial do perfil 3.

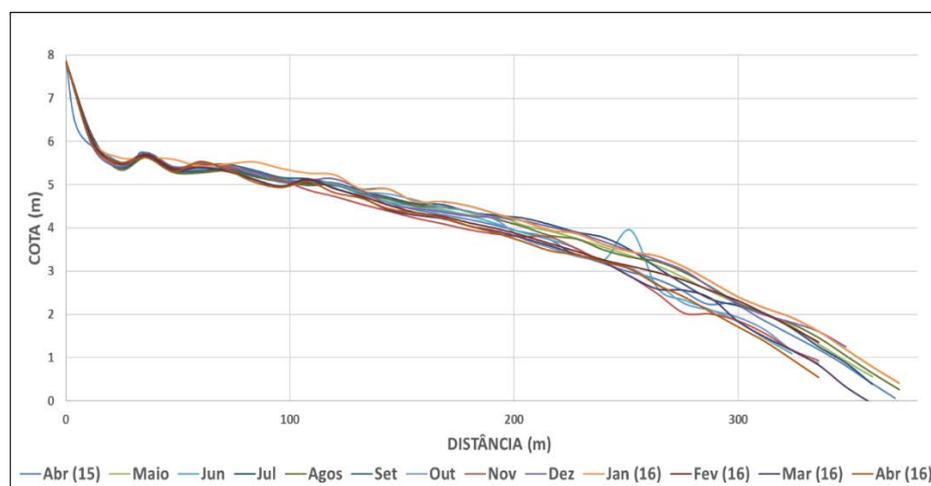


Figura 9 - Perfis praiiais realizados no setor 3.

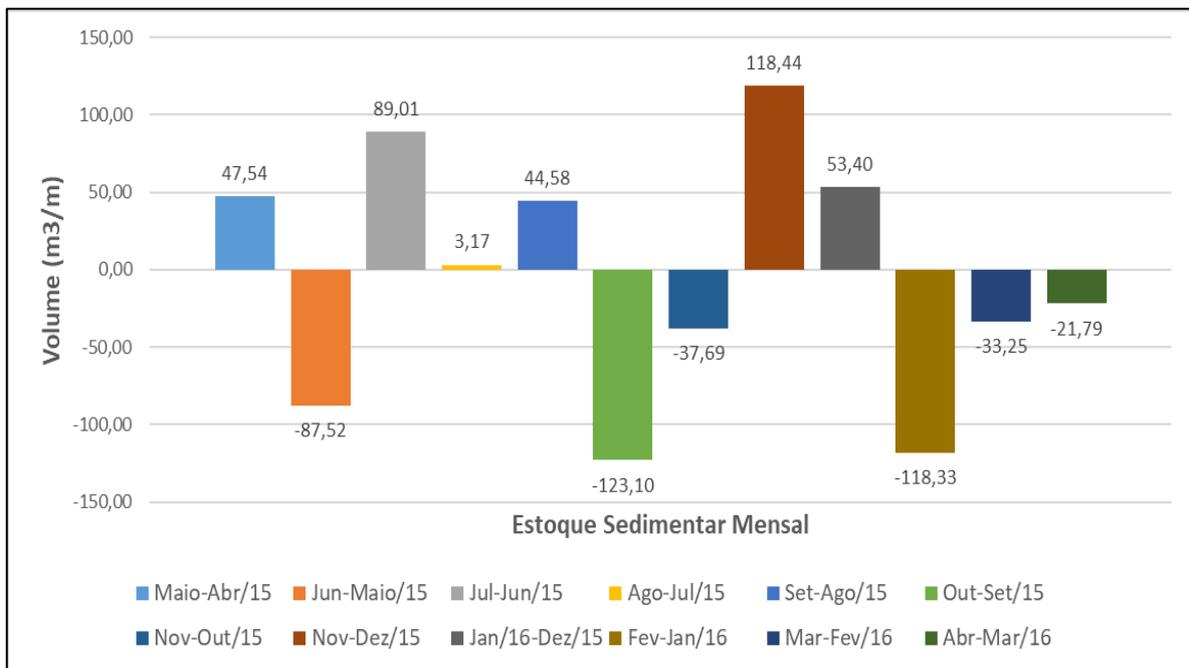


Figura 10 - Variação mensal de volume (em m³/m) entre os perfis realizados no Setor 3.

O setor 4 está localizado a sotamar do espigão rochoso, na zona de sombra para transporte de sedimentos por deriva litorânea. Este setor apresenta extensão máxima de 450 m do prisma praial e características de margem de canal, onde dois bancos separaram uma zona de *megaripples* e a margem com alta declividade onde acumulam-se seixos lateríticos. Os bancos podem alcançar 1,5 m de altura e cerca de 100 m de extensão. Antecedendo os bancos existe um terraço-de-maré (*tidal flat*), que abriga uma zona de deposição de lama (silte + argila) indicando uma condição de baixa hidrodinâmica que

antecede os bancos arenosos. A variação de volume oscilou pontualmente no setor 4, com as maiores diferenças relacionadas aos bancos e calhas de maré (Figura 11). O balanço sedimentar do setor 4 foi de -496 m³/m, o que corresponde a 644 toneladas de areia fina removida deste perfil, referindo-se à soma (balanço líquido) dos valores mensais nos meses de monitoramento (Figura 12).

A granulometria da praia da Ponta da Areia é composta por areia fina (2,3 – 2,8 phi), refletindo o grau de seleção dos grãos por ação das ondas na zona de arrebenção (tabela 2).

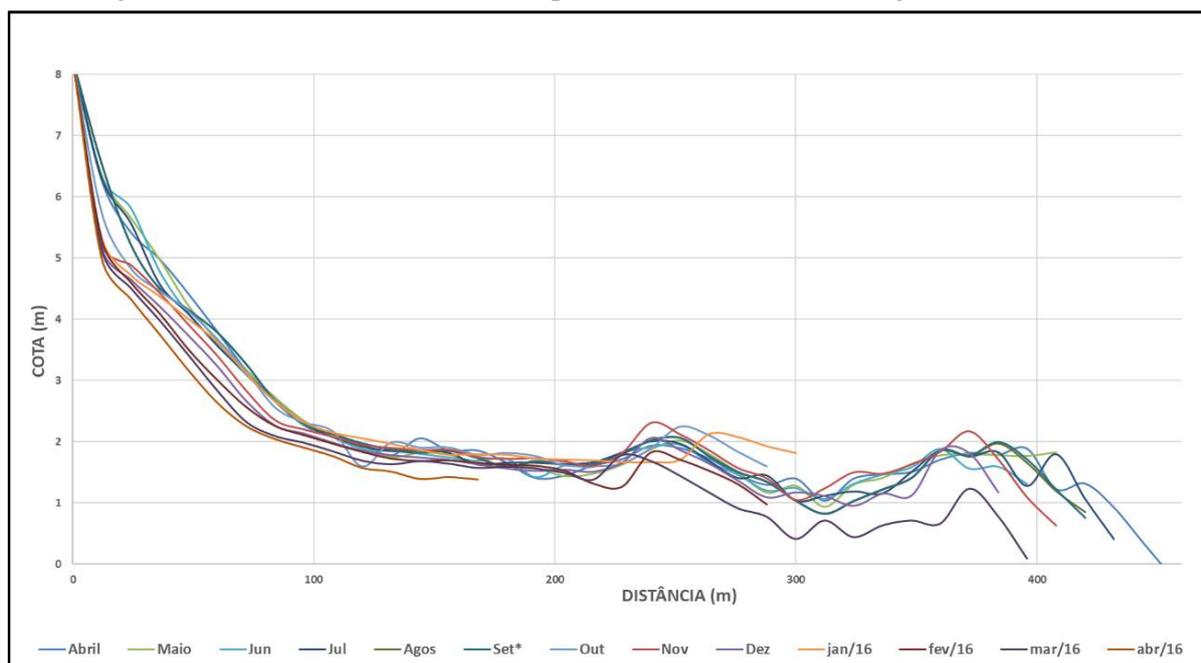


Figura 11 - Perfis praias realizados no setor 4.

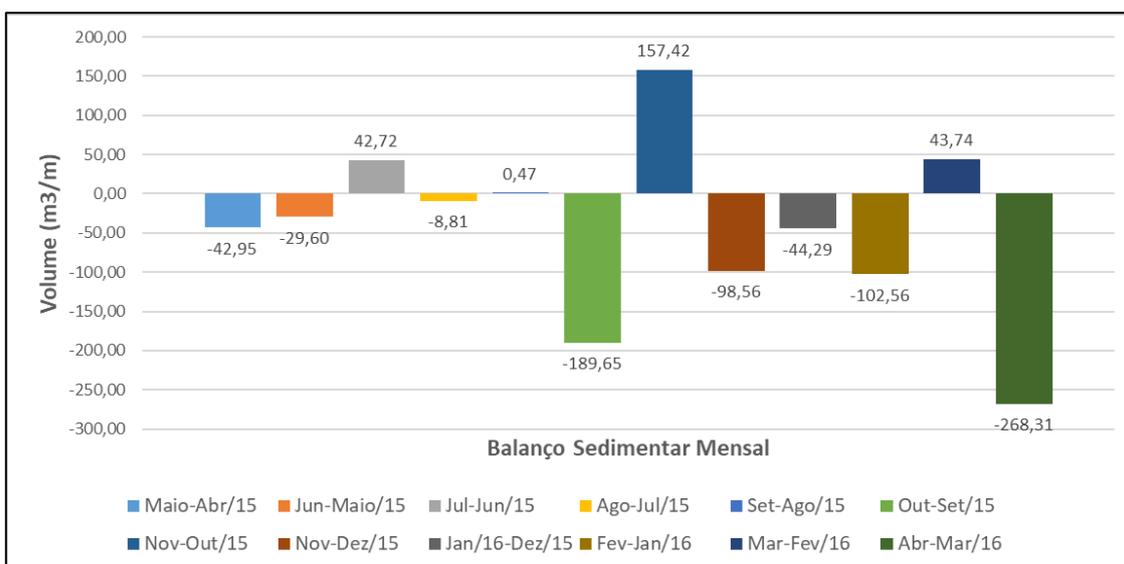


Figura 12 - Variação mensal de volume (em m³/m) entre os perfis realizados no Setor 4.

DISCUSSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho refletem a relação entre altura, período de onda, granulometria e a morfologia da praia da Ponta da Areia. Este sistema praiial tem o transporte de sedimentos via deriva litorânea (sentido SW) como seu principal modelador. Desta forma, as calhas de maré, sangradouros e sistemas fluviais que adentram este sistema praiial sempre emulsionam suas barras no sentido à deriva.

Esta característica favorece a mitigação da erosão costeira utilizando-se de obras longitudinais aderentes (enrocamentos e/ou paredes) e obras transversais (espigões e/ou molhes) com referência nesta deriva e feições sedimentares originadas.

O espigão rochoso da Ponta da Areia é uma construção transversal fixada numa desembocadura fluvial que se estende do pós-praia até atingir a antepraia atuando efetivamente sobre o transporte de sedimentos via deriva litorânea.

As funções desta estrutura é bloquear o transporte de sedimentos litorâneo fazendo com que ocorra deposição a montante, mas erosão a jusante. A sua eficácia depende do volume de sedimentos transportados, uma vez que o seu efeito consiste em provocar a deposição de sedimentos através da interceptação do fluxo longitudinal.

Apesar implantação de um espigão rochoso na praia da Ponta da Areia a erosão costeira ainda é bastante visível. Sua efetividade limita-se ao setor 3, demonstrando que sua implantação resolveu, até agora, apenas parcialmente o problema, como indicado pela ampla maioria da praia, que ainda apresenta uma tendência erosiva.

Esta natureza erosiva se processa mesmo nas posições a barlar do espigão onde seria esperado ao menos uma estabilidade dos setores, o que de fato não ocorreu. Isto deve-se provavelmente a um enrocamento (*seawall*) paralelo à linha de costa no setor 2 que devido a erosão nas laterais tornou-se um pequeno promontório. Isto aprofundou a zona de arrebenção alterando a dinâmica da deriva potencializando seu efeito localmente, o que impede uma deposição efetiva de sedimentos neste setor (Albuquerque, 2018).

Resultado disto, o setor 2 caracteriza-se por ser o perfil mais estável de todos os perfis monitorados, com a menor resultante no balanço sedimentar de apenas 22,6 toneladas de sedimentos erodidos. Apesar do setor 3 encontrar-se imediatamente ao lado do espigão costeiro não foi constatado no monitoramento que este setor continue progradando.

A praia da Ponta da Areia encontra-se em um ambiente deposicional costeiro dominado por marés, no entanto, as ondas desempenham papel fundamental na sua morfologia. A zona de arrebenção transita (em sentido perpendicular) por centenas de metros da face praiial a cada ciclo de maré, modelando perfis praiiais planos e suaves com poucas feições.

Segundo Mallmann et al. (2014) praias de macromaré geralmente exibem um gradiente topográfico suave e um reduzido estoque sedimentar subaquoso de areia fina em forma de bancos arenosos, com uma zona de arrebenção caracterizada por ser deslizante e sem presença de corrente de retorno. Porém, cabe ressaltar que na praia da Ponta da Areia existem extensos

setores de calhas de maré, onde na maré baixa as correntes de retorno podem pontualmente estarem associadas a estas feições.

Segundo Short (1991), um dos extremos na classificação morfodinâmica de praias dominadas por ondas é o terraço de baixa-mar, que basicamente consiste na formação de bancos e calhas que suportam na maré baixa características dissipativas, e na maré alta características intermediárias a reflectivas.

Este estágio resulta de uma diferenciação em termos da declividade da praia quanto a exposição às marés de quadratura e sizígia, ou seja, o limite superior da maré de quadratura impõe declividades mais brandas quando comparadas a sizígia.

A granulometria da praia e a altura das ondas na zona de arrebenção refletem este processo, selecionando grão maiores acima do limite de marés de quadratura, bem como as ondas incidentes. Partindo destas características, o parâmetro Ω e RTR foram calculados tanto para maré baixa como para a maré alta.

O resultado disto é que se obteve uma dupla caracterização dos estágios morfodinâmicos variando de um estágio *Low Tide Bar/Rip* quando a maré se encontra alta e a zona de arrebenção é bem desenvolvida e pouco extensa, e *Ultra-Dissipative* na maré baixa quando a zona de arrebenção adquire grande extensão. A variabilidade do parâmetro Ω , esteve entre 2,4 e 3,3, os valores de RTR ficaram entre 6,3 e 8,1, indicando notadamente que esta praia é modificada pela ação da maré ($3 < RTR < 15$).

De modo geral, o estágio *Low Tide Bar/Rip* é caracterizado por se desenvolver de maneira acrescional em um perfil dissipativo, com um relevo de banco e calha bem acentuados, onde as ondas arrebençam no banco e acentuam a profundidade da calha à medida que avança a maré baixa.

O sistema praiado instalado no esporão arenoso da praia da Ponta da Areia resulta numa reduzida variabilidade morfodinâmica, principalmente devido a esta praia manter ao longo do ano os mesmos estágios praiados independente da variação de ventos e regime de ondulação da estação seca e chuvosa (Franco, 2018).

Os resultados da variabilidade volumétrica dos setores monitorados na praia da Ponta da Areia indicam ser muito comum alternâncias abruptas e sequenciais de acreção e erosão.

Isto decorre do fato da praia da Ponta da Areia ter seu estoque sedimentar flutuante ao longo da praia. Franco (2018) identificou na praia do

Calhau que grandes volumes de areia transitam pela orla sendo controlados por espigões naturais posicionados na zona intermaré inferior, que em quadratura retém areia, e em condições de sizígia liberam este sedimento, principalmente pelo transporte na porção superior da praia (zona intermaré superior).

Além disso, o setor 3 a montante do espigão, acompanha as tendências erosivas observadas nos demais setores.

Apesar do balanço sedimentar dos setores apresentarem diferenças relacionadas com a distância e posição do espigão rochoso, a resultante ao fim do monitoramento indica que a praia da Ponta da Areia encontra-se ainda submetida a processos erosivos costeiros. Isto indica que o espigão rochoso reduziu os processos erosivos localmente e de forma efetiva enquanto era amplo o espaço de acomodação relacionado ao prisma praiado a montante do mesmo.

Uma vez preenchido este espaço de acomodação, a praia encontrou novamente seu equilíbrio, onde a deriva de sedimentos litorâneos retomou sua dinâmica tornando a transportar sedimentos pelo prisma praiado em todos os setores, inclusive no setor 3, onde os sedimentos transladam o espigão via subaquática, pois o termino do espigão encontra-se na zona de arrebenção em maré baixa.

A erosão observada no setor 4 era prevista, visto que o suprimento sedimentar é bloqueado a barlar do espigão rochoso, no entanto, valores acrescenciais estiveram presentes indicando que ao menos uma parte dos sedimentos transpassa o espigão, ou estão relacionados a dinâmica da foz do rio Anil.

A variabilidade do setor 3, está relacionada a movimentação de areias na face praiado até o limite da maré alta de sizígia (zona intermaré superior). A baixa movimentação de areias no campo de dunas é indicativa do elevado estoque sedimentar neste compartimento.

Albuquerque (2018) estimou o transporte neste compartimento com base em experimentos com armadilhas eólicas indicando o total de 7 kg/m²/h de sedimentos transportados por rolamento e saltação, indicando que apesar da elevada estabilidade, esta localidade é um ponto de transpasse (*bypass*) de sedimentos que cruzam o espigão rochoso.

O balanço positivo de sedimentos no período de estiagem (agosto a novembro) no setor 3, possivelmente indica uma maior eficiência no

transporte eólico, que amplia o estoque sedimentar subaéreo. A maior mobilidade de dunas no setor 3 encontrou-se vinculada aos meses de dezembro e fevereiro devido a este ser o período com a maior intensidade de ventos do quadrante nordeste/leste.

Outro aspecto que potencializa o transporte neste período é que ao final da estação seca a vegetação sofre uma redução de sua biomassa aérea, diminuindo o coeficiente de arraste aerodinâmico e possibilitando ampla movimentação de areia por rolamento e saltação.

As praias oceânicas da Ilha do Maranhão experimentam um transporte longitudinal de sedimentos pontuado por interrupções (espigões naturais). Este bloqueio ao menos parcial da deriva litorânea acontece devido a feições geomorfológicas herdadas do processo erosivo que atuou e ainda atua sobre a topografia antecedente (Lima et al., 2020). À medida que se processou a Última Transgressão Marinha Pós-Glacial a erosão da antepraia sobre os sedimentos da Formação Itapecuru resultou no desenvolvimento de um *lag*

transgressivo, onde cascalhos e blocos lateríticos foram aprisionados na face praial devido a seu tamanho sendo reorganizados em formato espigões costeiros. Estes espigões naturais projetam-se em direção da antepraia tornando-se expostos somente a partir da zona intermaré média.

Isto ocasiona um bloqueio seletivo do transporte longitudinal devido ao posicionamento na face praial de tais feições. Nas marés de quadratura o sedimento permanece retido a montante destas feições, enquanto que nas marés de sizígia o fluxo é livre de feições, e a zona de arrebentação se estabelece na zona intermaré superior. O resultado disto, o transporte longitudinal é fluante e dependente da maré.

A influência das feições naturais na praia da Ponta da Areia pode ser observada no atual estado erosivo em que se encontra submetida. Imediatamente a montante do setor 1, um espigão natural de rochas lateríticas, transversal a linha de costa, barra parcialmente o transporte litorâneo impedindo que os sedimentos cheguem aos demais setores do presente estudo (Figura 13).



Figura 13 - Espigão natural a montante do setor 1. A direita do espigão encontra-se uma pessoa em pé como referência de escala.

Esta feição controla a evolução dos setores 1 e 2, e é responsável pela erosão costeira de longo termo. Este déficit sedimentar ocorre por dois mecanismos: 1- aprisionamento do sedimento a montante do espigão; 2- deflexão de parte dos sedimentos transportados pela deriva litorânea para profundidades além da profundidade de fechamento (Hallermeier, 1981).

De modo amplo, os resultados de balanço sedimentar médio para todos os setores do período de estiagem (agosto a novembro) resultaram em $75 \text{ m}^3/\text{m}$, enquanto os resultados do período chuvoso (dezembro a julho) foram de $-780 \text{ m}^3/\text{m}$. Este resultado é compatível com os

dados de modelagem numérica realizados por Quadros (2016), onde identificou-se que na plataforma continental do Maranhão as maiores alturas de onda são observadas entre os meses de outubro a abril coincidindo com os meses de maiores pluviosidades na Ilha do Maranhão.

Com relação ao balanço sedimentar, era esperado que os perfis a sotamar (perfil 4) tivessem um comportamento erosivo devido à função desempenhada pelo espigão. O setor 3 continua por acumular sedimento e se tornar o setor com menor erosão e maior estabilidade da praia da Ponta da Areia.

A influência do espigão costeiro sobre os

setores 1 e 2 é mínima indicando que sua variabilidade está relacionada a sua natureza, ou seja, o setor 1 vinculado à disposição de um

espigão natural e o setor 2 vinculada a variabilidade interna do sistema de calhas de maré.

CONCLUSÃO

O sistema praiial do esporão arenoso da Ponta da Areia resulta numa reduzida variabilidade morfodinâmica, principalmente devido a esta praia manter ao longo do ano os mesmos estágios praiiais independente da variação de ventos e regime de ondulação da estação seca e chuvosa. Os dados obtidos para os estados modais da praia da Ponta da Areia (parâmetro Ômega Ω versus RTR) identificados para os perfis apresentam-se com tipologias variando entre *Low Tide Bar/Rip* na maré alta e o estágio *Ultra-Dissipative* na maré baixa.

Apesar do balanço sedimentar dos setores apresentarem diferenças relacionadas com a distância e posição do espigão rochoso, a resultante ao fim do monitoramento indica que a Praia da Ponta da Areia continua submetida a processos erosivos costeiros. Os resultados da

variabilidade volumétrica dos setores monitorados na praia da Ponta da Areia indicam ser muito comum alternâncias abruptas e sequenciais de acreção e erosão. Isto decorre do fato da praia da Ponta da Areia ter seu estoque sedimentar flutuante ao longo da praia, sendo parcialmente retido feições geomorfológicas herdadas do processo erosivo que atuou e ainda atua sobre a topografia antecedente.

O presente estudo mostrou que a construção do espigão rochoso (setor 3) para a praia da Ponta da Areia não foi completamente eficiente, devido a zona de atuação (deposição; progradação) não compreender a totalidade da Ponta da Areia e ainda fatores como a presença de um outro espigão de formação natural (setor 1) acabar mantendo a erosão na base do esporão arenoso (*spit*).

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, S.S. **Estratigrafia, morfodinâmica e evolução de um esporão arenoso em ambiente macromaré: Ponta da Areia, São Luís -MA.** São Luís, 2018, 117p. Dissertação (Mestrado em Oceanografia), Universidade Federal do Maranhão.
- BIGARELLA, J.J. The Barreiras Group in northeastern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências: suplemento**, v. 47, p. 365-393, 1975.
- BIRKEMEIER, W.A. Fast accurate two-person beach surveys. **Coastal Engineering Technical Aid** 81-11. **Coastal Engineering Research Center, Vicksburg**; p. 1-22, 1981.
- BRANNER, J.C. Geology along the Pernambuco coast south of Recife. **Boletim de Geologia da Sociedade Americana.** Washington, v.13, p. 58 -92, 1902.
- CALLIARI, L.J. & KLEIN, A.H.F. Características morfodinâmicas e sedimentológicas das praias oceânicas entre Rio Grande e Chuí, RS. **Pesquisas**, v. 20, n. 1, p. 48-56, 1993.
- CALLIARI, L.J.; MUEHE, D.; HOEFEL, F.G.; TOLDO Jr., E. Morfodinâmica praiial: uma breve revisão. **Revista Brasileira de Oceanografia**, v. 51, p. 63-78, 2003.
- CAMARGO, M.G. Sysgran: Um sistema de código aberto para análises granulométricas do sedimento. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 36, n. 2, p. 345-352, 2006.
- CAMPBELL, D.F. **Revised report on the reconnaissance geology of the Maranhão basin.** Belém: PETROBRÁS, 117 p. 1949.
- CARNEIRO, M.C.S. M; DE SÁ, L.C.M; ARAUJO, T.C.M. Dinâmica costeira da praia de Suape – Pernambuco - Brasil. In: SIMGEO - SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, II. 2008. Recife. **Anais... Recife: SIMGEO**, 2008.
- CARTER, R.W.G. & WOODROFFE, C.D. **Coastal evolution: late quaternary shoreline morphodynamics.** Cambridge, Cambridge University Press. 255 p., 1995.
- DIRETORIA de HIDROGRAFIA e NAVEGAÇÃO. 2004. **Tábua das Marés para o Porto de Suape (Estado de Pernambuco).** Disponível em: <<http://www.dhn.mar.mil.br>>
- FOLK, R.L. & WARD. W.C., Brazos River Bar: Study and significance of grain size parameters. **Journal of Sedimentary Petrology**. v. 27, p. 03-26, 1957.
- FRANCO, B.J. **Caracterização Morfodinâmica das Praias Oceânicas da Ilha do Maranhão.** 2018. São Luiz. Trabalho (Conclusão de Curso), Departamento de Oceanografia e Limnologia. Universidade Federal do Maranhão.
- HALLERMEIER, R.J., A profile zonation for seasonal sand beaches from wave climate, **Journal of Coastal Engineering**, v. 4, p. 253-277, 1981.
- HOEFEL, F.G. **Morfodinâmica de Praias Arenosas Oceânicas: Uma Revisão Bibliográfica.** Itajaí: Editora da UNIVALI. 91 p., 1998.
- LIMA, L.G.; ALBUQUERQUE, S.; CERVEIRA, G.; PARISE, C.K.; FERREIRA, M.S.; FRANCO, B.J. Estratigrafia e Evolução de Um Esporão Arenoso em Ambiente de Macromaré: Ponta da Areia - São Luís - Maranhão - Brasil. **São Paulo Geociências**, v. 39, p. 997-1008, 2020.
- MALLMAN, D.L.B.; PEREIRA, P.; SANTOS, F.; FAÇANHA, P. Classificação morfodinâmica das praias arenosas de Ipojuca (Pernambuco, Brasil) através da análise semântica de imagens de satélite pancromáticas. **Pesquisas em Geociências, Rio Grande do Sul**, v. 41, n. 2, p. 169–189, 2014.
- MASSELINK, G. & SHORT, A.D. The effect of the tide range on beach morphodynamics and morphology: a conceptual beach model. **Journal of Coastal Research**, v. 9, n. 3, p. 785-800, 1993.
- PEREIRA da SILVA, R.; CALLIARI, L.J.; TOZZI, H.A.M. The influence of washouts on the erosive susceptibility of the Rio Grande do Sul coast between Cassino and Chuí Beaches, southern Brazil. **Journal of Coastal Research Special Issue**, n. 35, p. 332-338, 2003.
- QUADROS, E.A.S. **Caracterização Do Clima De Ondas Na Plataforma Continental Do Maranhão E Região Oceânica Adjacente Por Meio De Modelagem Numérica**, p. 48, 2016. São Luiz. Trabalho (Conclusão do Curso de Oceanografia), Departamento de Oceanografia e Limnologia, Universidade Federal do Maranhão.
- ROY, P.S., COWELL, P.J., FERLAND, M.A. & THOM, B.G.

- Wave Dominated Coasts. In: CARTER R.W.G. & WOODROFFE CD (Ed.), **Coastal Evolution, Late Quaternary Shoreline Morphodynamics**, Cambridge: Cambridge University Press, p. 121-186, 1994.
- SHORT, A.D. Macro-meso tidal beach morphodynamics – an overview. **Journal of Coastal Research**, v.7, n. 2, p. 417 – 436, 1991.
- SHORT, A.D. Beach response to variations in breaker height. In: INTERNATIONAL CONFERENCE COASTAL ENGINEERING, 17. Sidney, Australia, 1980. **Proceedings...** New York: American Society of Civil Engineers. p. 1016-1035, 1981.
- SOUZA FILHO, P.W.M. **A Planície Costeira Bragantina (NE do Pará): influência das variações do nível do mar na morfoestratigrafia costeira durante o Holoceno**. 123 p., 1995. Belém: Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências.
- SUGUIO, K. **Introdução à Sedimentologia**. São Paulo: Ed. Edgard Blucher Ltda. São Paulo. 318 p. 1973.
- WRIGHT, L.D. & SHORT, A.D. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis. **Mar. Geol.**, v. 56, n. 1-4, p. 93-118, 1984.
- WRIGHT, L.D. & THOM, B.G. Coastal Depositional Landforms: A Morphodynamic Approach. **Progress in physical Geography**, v. 1, p. 412-459, 1977.
- WRIGHT, L.D.; CHAPPELL, J.; THOM, B.G.; BRADSHAW, M.P.; COWELL, P. Morphodynamics of reflective and dissipative beach and inshore systems: Southeastern Australia. **Mar. Geol.**, v. 32, n. 1-2, p. 105-140, 1979a.
- WRIGHT, L.D.; CHAPPELL, L.; THOM, B. G. Morphodynamics variability of high energy beaches. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COASTAL ENGINEERING. 16. Hamburg, 1979. **Proceedings...** New York: American Society of Civil Engineers, p. 1180-1194, 1979b.
- WRIGHT, L.D.; SHORT, A.D.; NIELSEN, P. **Morphodynamics of high energy beaches and surf zones: a brief synthesis**. University of Sidney, Coastal Studies Unit Technical Report, v. 82/5, 64 p., 1982.

*Submetido em 13 de janeiro de 2022
Aceito para publicação em 2 de junho de 2022*