REDE
ISSN:1982-5528
Revista Eletrônica do PRODEMA
Journal Homepage: www.revistarede.ufc.br
D.O.I: 10.22411/rede2020.1401.11

RESPOSTAS MORFOLÓGICAS DO SISTEMA PRAIA-DUNA A EVENTOS DE RESSACA DO MAR

BEACH-DUNE SYSTEM'S MORPHOLOGICAL RESPONSES TO STORM EVENTS

RESPUESTAS MORFOLÓGICAS DEL SISTEMA PRAIA-DUNA EN EVENTOS DEL MAREJADAS

Davis Pereira de Paula [1]
Melvin Moura Leisner [2]
Yan Gurgel Vasconcelos [3]
Francisco Rodrigo Cunha de Sousa [4]

RESUMO:

O sistema praia-duna é caracterizado por ser um ambiente sujeito a alterações na morfologia e no volume de sedimentos devido à atuação de diferentes processos (e.g. marinhos, continentais, atmosféricos, antrópicos). No caso do litoral de Caucaia, localizado na Região Metropolitana de Fortaleza, esse sistema se encontra, em sua maior parte, antropizado e sob forte processo de erosão marinha. Desse modo, é importante compreender as respostas morfológicas em diferentes situações do ano. Para esse fim, foi definido um trecho costeiro da Praia da Tabuba em que o sistema praia-duna ainda está preservado. Nesse caso, trata-se de um sistema geomórfico formado por uma faixa de praia arenosa, com presença de dunas frontais na porção superior da praia. As dunas e a praia funcionam como barreira primária de proteção da costa contra o avanço do mar. Para o desenvolvimento do estudo foram coletados dados referentes às condições oceanográficas, contendo informações de ondas, ventos e marés da área analisada. Na determinação das variações morfológicas e seus impactos, foram realizados mensalmente (janeiro a dezembro de 2019) 36 perfis topográficos perpendiculares à linha de costa em três setores previamente definidos. Os dados obtidos viabilizaram a determinação de diferentes escalas de impacto de ondas de ressaca do mar. Em síntese, os setores analisados apresentaram respostas distintas consoantes às características fisiográficas da área, mas que ratificam o caráter protetivo das dunas frontais face a eventos de alta energia de ondas.

Palavras-chave: Sistema praia-duna; impactos costeiros; ressacas do mar.

ABSTRACT:

The beach-dune system is characterized by an environment subject to shifts in the morphology and volume of sediments due to the performance of different processes (such as the marine, continental, atmospheric, and anthropic ones). In the case of the Caucaia coast, located in the Metropolitan Region of Fortaleza, this system is found mostly anthropized and under a strong process of coastal erosion. It is important to understand, therefore, its morphological responses in different situations of the year. For this purpose, a Praia da Tabuba coastal stretch with a preserved beach-dune system was selected. It consists, in this case, of a geomorphic system formed by a sandy beach strip, with the presence of foredunes in the upper portion of the beach. The dunes and the beach act as a primary barrier for the protection of the coast against the advancing sea. For the study development, data were collected regarding oceanographic conditions containing information about waves, winds, and tides in the

[1]Universidade Estadual do Ceará (UECE). davis.paula@uece.br
[2]Universidade Estadual do Ceará (UECE). melvin.leisner@aluno.uece.br
[3]Universidade Estadual do Ceará (UECE). yangurgelv@gmail.com
[4]Universidade Estadual do Ceará (UECE). rodrigofrcs@hotmail.com

ISSN: 1982 - 5528
D.O.I: 10.22411/rede2020.1401.11

analyzed area. To determine the morphological variations and impacts, 36 topographic profiles perpendicular to the coastline in three previously defined sectors were carried out monthly (from January to December 2019). Data obtained enabled the determination of different scales of undertow impact. In brief, the analyzed sectors presented different responses depending on the physiographic characteristics of the area, ratifying, though, the protective character of the foredunes against high-energy wave events.

Keywords: Beach-dune system; coastal impacts; undertows.

RESUMEN:

El sistema playa-duna se caracteriza por ser un entorno costero altamente dinámico, sujeto a cambios en la morfología y volumen de sedimentos debido al desempeño de diferentes procesos (por ejemplo, marino, continental, atmosférico, antrópico). En el caso de la costa de Caucaia, ubicada en la Región Metropolitana de Fortaleza, este sistema es, en su mayor parte, antropizado y sometido a un fuerte proceso de erosión marina. Por tanto, es importante conocer las respuestas morfológicas en diferentes situaciones del año, para ello se definió un tramo costero de Praia da Tabuba en el que aún se conserva el sistema playa-duna. En este caso, se trata de un sistema geomórfico formado por una franja de playa arenosa con presencia de dunas frontales en la parte superior de la playa. Las dunas y la playa actúan como barrera principal para proteger la costa del avance del mar. Para el desarrollo del estudio se recolectaron datos sobre las condiciones oceanográficas, que contienen información sobre olas, vientos y mareas en el área analizada. En la determinación de las variaciones morfológicas y sus impactos, se realizaron mensualmente 36 perfiles topográficos perpendiculares al litoral en 3 sectores previamente definidos (enero a diciembre de 2019). Los datos obtenidos permitieron determinar diferentes escalas de impacto de olas. En resumen, los sectores analizados mostraron respuestas diferentes en función de las características fisiográficas de la zona, pero que ratifican el carácter protector de las dunas frontales frente a eventos de alta energía undimotriz.

Palabras-clave: Sistema playa-duna; Impacto da tempestade; Aumento do nível do mar.

1 INTRODUÇÃO

As praias são ambientes de alta dinamicidade, caracterizadas pela constante alteração da morfologia e do volume de sedimentos (WRIGHT & SHORT, 1985; ÂNGULO, 2004; OLIVEIRA FILHO & FERNANDES, 2017). Logo, estudos da morfodinâmica praial denotam suma importância, uma vez que esse ambiente é considerado bastante vulnerável frente às modificações antrópicas e naturais (BARBOSA et al., 2007), cujos processos marinhos, continentais e atmosféricos interagem entre si, dando origem à paisagem costeira (MICALLEF & WILLIAMS, 2002; MAIA et al., 2005).

O estado morfodinâmico de uma praia depende de uma série de agentes interdependentes que condicionam um equilíbrio morfológico-dinâmico do sistema praial. Logo, maré, ondas e ventos são condicionantes responsáveis pelo deslocamento de sedimentos e pela modelagem fisiográfica da costa, onde as feições erosivas e deposicionais são variáveis (MASSELINK et al., 2006; MASSELINK & HETEREN, 2014). Nesse caso, os eventos extremos de ondas (ressacas do mar) podem promover rápidas mudanças morfológicas em sistemas costeiros, tal como ocorre em praias e dunas.

Associados às praias, existem subsistemas costeiros que são importantes para a manutenção do equilíbrio sedimentar, como falésias e dunas, por exemplo. No caso deste estudo, as praias e as dunas são as geoformas presentes na Praia da Tabuba, em Caucaia (CE), em que o processo erosivo tem destruído os empreendimentos costeiros. Tal fato tem levado a um processo de abandono social das

ISSN: 1982 - 5528
D.O.I: 10.22411/rede2020.1401.11

atividades recreativas nesse trecho do litoral de Caucaia, assim como já ocorreu nas praias de Iparana, Pacheco e Icaraí, todas inseridas na mesma costa.

As geoformas dunares, que são ecossistemas frágeis assim como a zona praial, são formadas por depósitos eólicos de diferentes composições ao longo do tempo geológico, podendo ser vegetadas ou não (MARTELO & NICOLODI, 2018). Os sistemas dunares possuem uma ampla gama de variações morfológicas e ecológicas (JUDD, 2014; HESP, 2002), no qual as dunas frontais se destacam por serem a primeira linha de defesa do continente contra a incidência de grandes ondas e elevações do nível da água do mar (LARSON et al., 2004).

As ressacas do mar são eventos naturais que provocam mudanças rápidas e muitas vezes extremas em áreas costeiras, em particular no sistema praia-duna de costas arenosas (SCHLACHER et al., 2007; BRENNER et al., 2018). Conforme destacam Dolan e Davis (1992), as tempestades costeiras, popularmente denominadas de ressacas do mar (MELO et al., 2016), podem ser desde fracas e moderadas até severas e extremas, quando as características energéticas máximas regionais são alcançadas ou até superadas. Tais fatores potencializam o processo de erosão costeira ao retirarem sedimentos da praia subaérea e, por vezes, das dunas frontais, resultando no aumento da exposição da costa e na intensificação dos eventos de inundação (CALLIARI & KLEIN, 1999). Além disso, impactam ciclos de vida e biomas associados aos ambientes estuarinos e oceânicos, bem como atividades e infraestruturas litorâneas, provocando danos à saúde pública e à economia nessas regiões (ASHTON et al., 2008; MUSSI, 2011).

Um considerável campo da literatura publicada documentou os impactos de tempestade para praias arenosas (ZEIGLER et al., 1959; LEE et al., 1998; CASTELLE et al., 2015) e dunas (HESP, 2002; PSUTY et al., 2005; HOUSER, 2012; LENTZ et al., 2011). Alguns estudos avaliam as mudanças da morfologia utilizando uma variedade de métricas de praia que incluem a variação de volume, a posição da duna e linha de costa e a topografia do perfil de elevação transversal, enquanto outros estimam a vulnerabilidade do sistema praia-duna face aos impactos das ondas e eventos de alta magnitude (LEE et al., 1998; SALLENGER, 2000; STOCKDON et al., 2007; SUANEZ et al., 2015).

Estudos como os de Sallenger (2000) e Sallenger et al. (2003) criaram uma escala que divide impactos de tempestade em categorias para as praias classificadas entre intermediárias e refletivas frente à incidência e aos eventos de intensa energia. A proposta tem como base a definição do run-up (máximo alcance vertical do espraio das ondas de tempestade) e sua relação com a geometria da face de praia e das dunas frontais.

Atrelada às consequências ocasionadas pela elevação do nível do mar, tem-se a problemática da crescente ocupação urbana desordenada na região costeira (PIERRI, 2006; MEIRELES, 2008). O processo de ocupação do litoral é impulsionado por múltiplos fatores de desenvolvimento socioeconômico, com destaque para o turismo e suas atividades auxiliares. Esses processos possuem como resultante direta uma forte urbanização da zona costeira, que reduzem a capacidade de resiliência desses ambientes costeiros, principalmente quando artificializados por estruturas e intervenções urbanas (NEVES & MUEHE, 2010; MATIAS, 2010; LIMA, 2014).

REDE Revista Eletrônica do PRODEMA
Journal Homepage: www.revistarede.ufc.br
ISSN: 1982 - 5528
D.O.I: 10.22411/rede2020.1401.11

Na Praia da Tabuba, objeto deste estudo, o processo de ocupação não foi diferente do retratado anteriormente. Nesse caso, o processo de ocupação foi regido pelas atividades de veraneio, conduzindo a um processo massivo de ocupação da costa com respostas erosivas. Dessa forma, o presente estudo busca compreender como as respostas morfológicas do sistema praia-duna são induzidas por diferentes forçadores ao longo de um ciclo anual.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

A área de estudo está localizada no litoral do município de Caucaia (Figura 1), pertencente à Região Metropolitana de Fortaleza (RMF) e situada a cerca de 25 km do centro de Fortaleza, capital do Estado do Ceará. A Praia da Tabuba tem sua principal via de acesso à rodovia estadual CE-090, sendo delimitada a leste pela laguna do rio Barra Nova e a oeste pela praia do Cumbuco. Tabuba possui um trecho costeiro de aproximadamente 4,5 km de extensão, caracterizado por apresentar pontos de desova de tartarugas, campo de dunas, dunas frontais, barracas de praia, condomínios e obras de proteção costeira.



Figura 1. Mapa de localização da área de estudo.
Fonte: Elaboração dos autores.

2.2 Aquisição de Dados Oceanográficos

Os dados referentes às condições oceanográficas da área estudada foram obtidos em plataformas eletrônicas. Os geodados com informações de previsão de altura significativa (Hs), período primário (Ts), direção de onda, intensidade do vento (Ws) e direção do vento foram adquiridos no portal SurfGuru e no Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), vinculado ao Ins-

ISSN: 1982 - 5528
D.O.I: 10.22411/rede2020.1401.11

tituto Nacional de Pesquisa (INPE). O período analisado considerou as datas específicas dos trabalhos de campo, bem como todo o período anual de 2019.

As informações relativas à amplitude de maré foram disponibilizadas pela plataforma online da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), concernente ao marégrafo instalado no Porto do Pecém, que está localizado no munícipio de São Gonçalo do Amarante, cerca de 15 km de distância da área estudada. Todas as informações coletadas foram tabuladas no software excel, para análises estatísticas simples e estimativas das médias diárias, mensal e anual de cada série.

2.3 Levantamento morfológico

Para a investigação da variação morfológica, foram definidas três seções de monitoramento perpendicular à linha de costa. Nas seções foram realizados experimentos topográficos entre os meses de janeiro e dezembro de 2019. Nesse período, as seções foram reocupadas mensalmente, sempre na baixa-mar de sizígia, totalizando 36 perfis. Os setores foram previamente escolhidos conforme as características distintas do sistema praia-duna local. Cada setor foi definido por um ponto de controle, denominado de S1, S2 e S3. Todos os perfis topográficos foram identificados através de coordenadas UTM e os referenciais de níveis estão nivelados a zero da Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha Brasileira (Tabela 1).

Setores	Coordenadas (N)	Coordenadas (E)	Referência de Nível
S1	9594972.673	12001039.2776	7.635
S2	9595271.984	1200661.9490	8.859
S3	9595755.5085	1199968.9627	7.639

Tabela 1. Coordenadas e referência de nível para os setores da Praia da Tabuba.
Fonte: Elaboração dos autores.

A topografia costeira foi realizada com o auxílio de um GNSS RTK (*Real Time Kinematic*) GPS da South Galaxy G1S L1/L2, apresentando alta precisão em modo cinemático com correção em tempo real (RTK), ao qual foi operado acompanhando a morfologia do sistema praia-duna, desde o ponto mais elevado (crista da duna frontal) até a zona mais rebaixada (praia submersa), conforme a proposição de Birkemeier (1981). O RTK é uma técnica de posicionamento relativa ao Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS), que melhora significativamente a qualidade da indicação de coordenadas e a localização dos objetos ou feições na superfície terrestre.

Por conseguinte, os dados coletados pelo GPS Geodésico (RTK) foram tabulados e organizados em planilhas do software *Excel* e posteriormente enviados ao site do IBGE-PPP, que realiza um pós-processamento das coordenadas obtidas de forma mais precisa (Posicionamento por Ponto Preciso). Após a correção, os dados foram plotados no *software GeoBeach*® (versão 1.0), desenvolvido pelo Grupo Resmar da Universidade Estadual do Ceará, de modo que fossem obtidas informações quanto às variações das áreas emersas e submersas, perfis topográficos mínimos, médios e máximos dos dados mensais coletados.

REDE Revista Eletrônica do PRODEMA
Journal Homepage: www.revistarede.ufc.br
ISSN: 1982 - 5528
D.O.I: 10.22411/rede2020.1401.11

2.4 Escala de impactos de ressacas do mar

Os dados oriundos dos perfis topográficos fornecem variáveis substanciais para o cálculo de *Wave Run-up*. Na proposta de Sallenger (2000), é utilizada a equação proposta por Stockdon et al. (2006), em que se considera o nível máximo atingido pela água do mar após o espraio das ondas. Em outras palavras, cria-se um indicador com base no *run-up* (máximo alcance vertical do *swash*) das ondas de tempestade e sua relação com a geometria do sistema praia-duna da Tabuba. Logo, o cálculo é de suma importância para a determinação e classificação do impacto de ondas de tempestade nos setores avaliados na Praia da Tabuba para o ano de 2019.

O cálculo toma como base quatro parâmetros básicos, que estão diretamente ligados à geomorfologia da praia e aos processos oceanográficos, sendo eles, respectivamente: DHIGH, DLOW, RHIGH, RLOW (Figura 2). A crista da duna (DHIGH) é estabelecida pelo limite superior da duna frontal, enquanto a base da duna (DLOW) é o limite entre a face de praia e o início da duna. Os parâmetros de RHIGH e RLOW foram determinados com base no nível de maré, sobre-elevação meteorológica (*storm surge*), espraio (*run-up*) e empilhamento de ondas (*setup*).

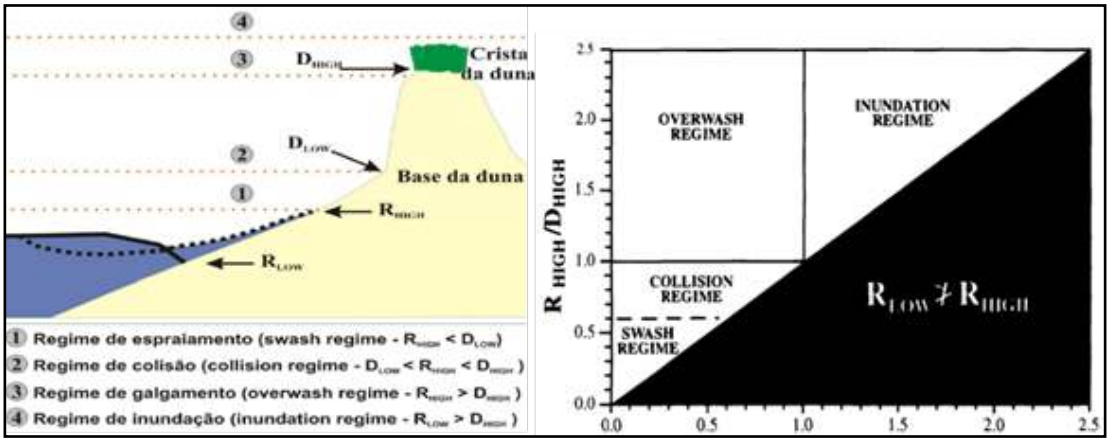


Figura 2. Modelo dos quatro regimes de impactos de tempestade.
Fonte: Paula (2012) adaptado de Sallenger (2000).

Dessa forma, Sallenger (2000) estabelece quatro escalas diferentes de classificação do impacto de ondas sobre a costa, sendo: Espraio (*swash regime*), Colisão (*collision*), Galgamento (*overwash*) e Inundação (*inundation*). Para a determinação de cada regime, utilizou-se a parametrização dos dados referentes à altura de onda (Hs), comprimento de onda (L), nível médio do mar (Rmena) e declive da face de praia (βf), que definem o alcance máximo da elevação do *run-up*, representado por R2, disposto na equação 1 (Sallenger, 2000; Stockdon et al., 2006).

$$R2 = \left(0{,}35\,\beta f (HsL)^{1/2} + \frac{\left[HsL\left(0{,}563\beta_f^2 + 0{,}004\right)\right]^{\frac{1}{2}}}{2} \right) \qquad (equação\ 1)$$

Onde: βf é o declive da praia (beach slope), Hs é altura significativa da onda, L é o comprimento de onda, definido pela equação $L=gT2/2\pi$. Os valores de 0,35 βf(HsL)^(½) se referem à sobre-elevação induzida pelas ondas (*setup*). Os dados relacionados à parametrização do espraio in-

ISSN: 1982 - 5528
D.O.I: 10.22411/rede2020.1401.11

cidente (*swash*) e das ondas infragravíticas estão representados na fórmula por $0{,}563\beta_f^2$ e 0,004, respectivamente.

Além disso, para identificar os setores mais vulneráveis ao impacto das ondas, foram definidos cenários distintos, com altura significativa (Hs) e período de onda (Tp) relativos a eventos de ressaca (ondas *swell*), em comparativo com as ondas sea. Para isso, considerou-se o alcance máximo da elevação do *run-up* (RHIGH), calculado conforme a equação 2 proposta por Sallenger (2000).

$$R_{HIGH} = R2 + nmean \qquad (equação\ 2)$$

Em que: R2 fora definido pela equação 1 e ηmean é o nível médio do mar (*mean sea level*) no momento da ressaca do mar, isto é, a soma da maré astronômica e da sobre-elevação meteorológica.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Caracterização dos principais parâmetros oceanográficos

Para o estudo, foram observadas preferencialmente as marés de sizígia durante os experimentos e coletas de dados em campo, devido à sua maior amplitude e poder de atuação sobre a hidrodinâmica e morfodinâmica do perfil praial. Durante o período analisado, os valores de baixa-mar variaram entre 0,1 m e -0,1 m, enquanto os valores de preamar variaram de 2,8 m a 3,1 m. Na região, as marés são do tipo semidiurna, com regime de mesomaré.

Nos experimentos dos meses de janeiro a março, a amplitude de marés se centrou entre -0,1 m a 3,0 m. Esta amplitude elevada se torna um fator preponderante que contribui para o aumento do poder energético das ressacas do mar que ocorrem predominantemente no primeiro semestre do ano. Os valores de amplitude dos experimentos ocorridos nos meses de agosto, setembro e outubro merecem destaque, pois houve incidência de ondas *swell* nesse período, apesar de ser um dado excepcional.

O regime de ondas da Praia da Tabuba se caracteriza por ser energético, considerando a moda dominante na costa do Ceará. Os valores de alturas significativas de ondas (Hs) variaram de 0,5 a 1,42 metros no período anual (Figura 3). O valor médio de Hs foi de 0,80 metros. Os meses que apresentaram maior altura significativa foram outubro e dezembro, ambos com Hs de 1,5 metros, enquanto maio e junho apontaram os menores, com 0,8 e 0,81, respectivamente. Apesar da diferença entre os valores máximos e mínimos, o regime de altura de ondas apresentou médias mensais semelhantes, mas que sofrem influência direta da sazonalidade.

REDE Revista Eletrônica do PRODEMA
Journal Homepage: www.revistarede.ufc.br
ISSN: 1982 - 5528
D.O.I: 10.22411/rede2020.1401.11

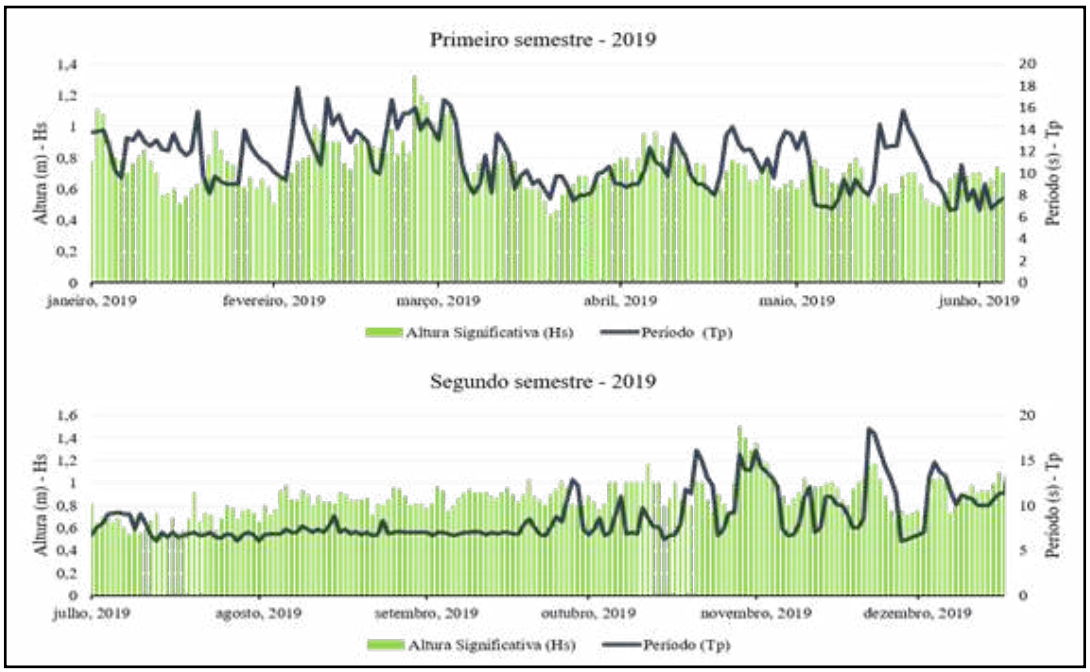


Figura 3. Média da altura significativa de ondas (Hs) e período de pico (Tp) para o ano de 2019.
Fonte: Elaboração dos autores.

Com relação ao período (Tp), o maior e o menor valor registrados foram de 16,5 a 6 segundos, respectivamente. O Tp médio para o primeiro semestre do ano foi de 11,4, enquanto para o segundo período do ano o valor decresceu para 9,04 segundos. Essa diferença sazonal do período das ondas está relacionada com sua classificação. Ondas com períodos de até 10 segundos, que possuem maior predominância e frequência na costa cearense, são classificadas como vagas (*sea*) e se caracterizam por serem agitações marítimas locais (SILVA et al., 2011). Já as ondulações do tipo *swell*, apesar de menor frequência, possuem maior energia e são caracterizadas por serem formadas no Atlântico Norte e, portanto, fora do raio de ação dos ventos locais. São as ondas *swell* que provocam alterações rápidas na paisagem, além de serem responsáveis por danos nas estruturas rígidas na costa e pela erosão das dunas frontais. Na Tabela 2 é possível verificar a variação média mensal da altura significativa (Hs) e o período (Tp), com destaques para a diferença sazonal.

Meses/2019	Altura Significativa (Hs)	Período (Tp)	Direção predominante
Janeiro	0,73	11,81	N/NNE
Fevereiro	0,88	13,55	N/NNE
Março	0,71	10,29	N/NNE
Abril	0,74	10,96	N/NNE
Maio	0,65	9,99	N/NNE
Junho	0,68	8,43	E/SE
Julho	0,67	7,27	E/SE
Agosto	0,84	7,12	E/SE
Setembro	0,88	7,65	E/SE
Outubro	0,95	9,47	E/SE
Novembro	0,94	10,67	E/SE
Dezembro	1,01	12,08	E/SE

Tabela 2. Síntese do clima de ondas da Praia da Tabuba a partir dos valores médios mensais.
Fonte: Autor, 2020.

ISSN: 1982 - 5528
D.O.I: 10.22411/rede2020.1401.11

Além disso, na Praia da Tabuba, as direções das ondas variam entre N/NNE e E/ESE (Figura 4). Entre os meses janeiro a junho, isto é, no primeiro semestre do ano, as ondas atuaram com predominância no quadrante N/NNE, enquanto no segundo semestre (julho a dezembro) a direção preponderante foi no quadrante E/ESSE. Essas variações também indicam influência da sazonalidade no primeiro semestre, como já destacado, sobre a ocorrência de ondas *swell* oriundas do Atlântico Norte, e no segundo, pela atuação dos ventos alísios, influências pela posição da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) (HASTENRARTH, 1985).

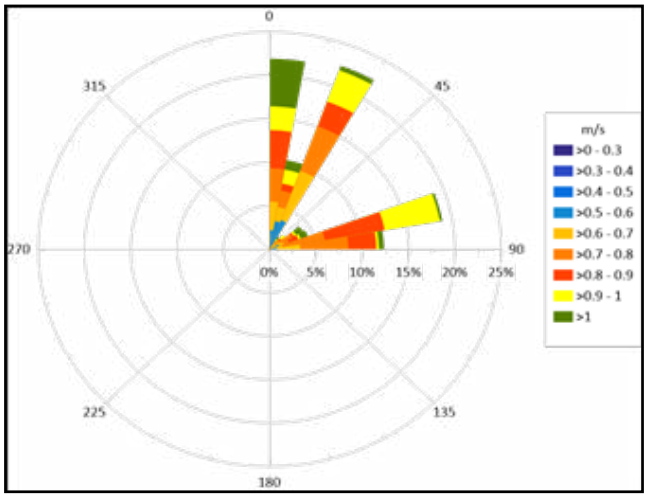


Figura 4. Direção predominante das ondas da Praia da Tabuba em 2019.
Fonte: Elaboração dos autores.

3.2. Mudanças morfológicas praia-duna

A análise das variações morfológicas ocasionadas pelos processos hidrodinâmicos (e.g. marés, ventos, ondas e correntes) foi determinada a partir do levantamento de 36 perfis topográficos transversais à linha de costa relativos a três setores que estão inseridos na área de estudo durante o ano de 2019. Em cada setor, foram obtidos os valores mensais de variação média do perfil, além das áreas emersas e submersas, a fim de que as mudanças morfológicas ficassem mais evidentes.

Na seção 1, situada no extremo leste da área de investigação, foi possível observar a partir da comparação entre o perfil realizado em janeiro (tracejado preto) e o perfil realizado em dezembro (tracejado vermelho) a diferença vertical de aproximadamente 1 metro (Figura 5). Essa diferença se concentrou primordialmente entre 30 e 50 metros da cota horizontal da praia emersa, onde se localiza o início da crista da duna frontal em direção ao estirâncio superior. Observa-se que o perfil praial local não apresenta formação de um berma bem definido, possuindo apenas um pequeno trecho da praia e a duna frontal como amortecimento da ação das ondas. A diferença entre a praia emersa e submersa (Figura 5) evidencia uma diminuição praticamente nula da faixa de praia, isto é, não houve indícios de um balanço negativo de sedimentos (erosão) no perfil analisado, apenas uma diferença natural e sazonal de perda e ganho de sedimentos.

ISSN: 1982 - 5528
D.O.I: 10.22411/rede2020.1401.11

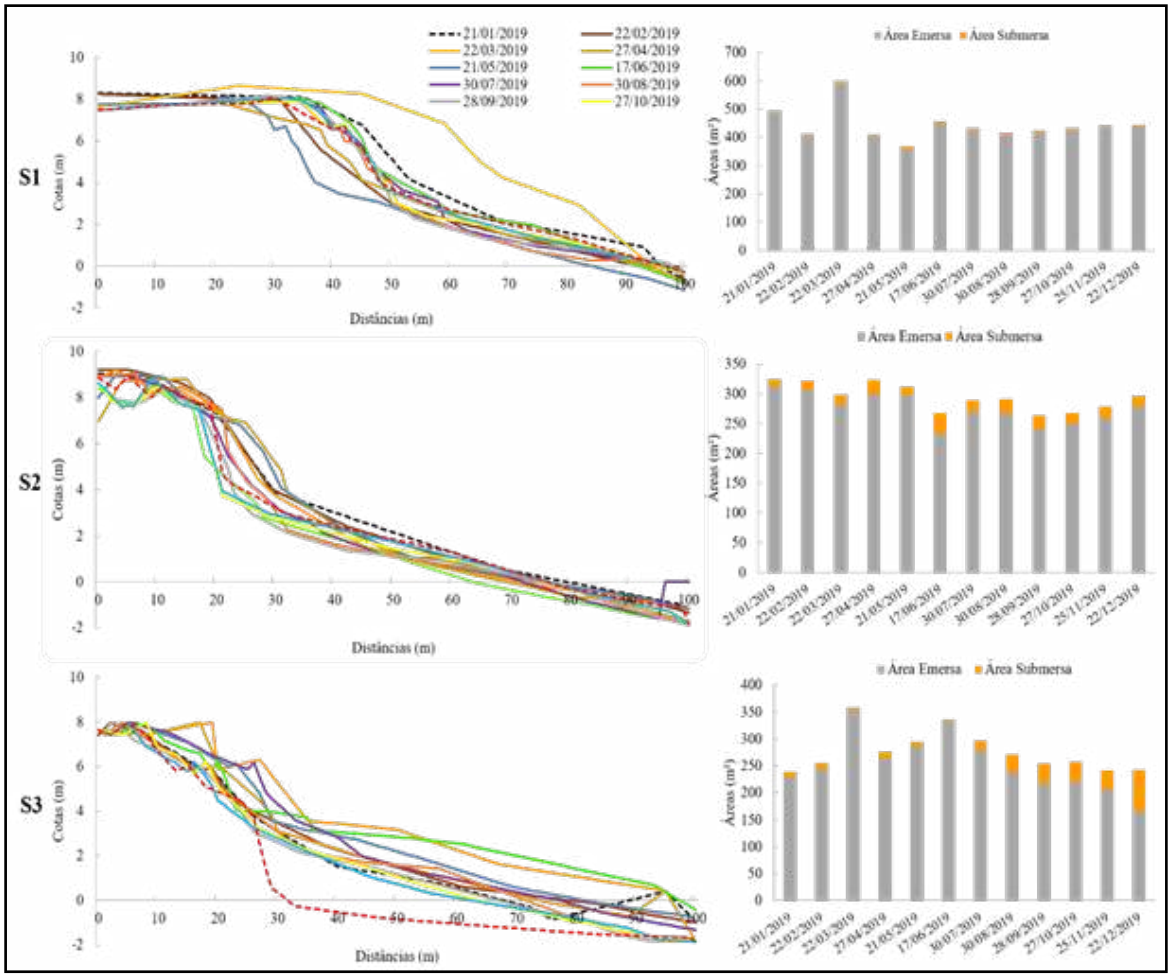


Figura 5. Variação dos perfis médios dos três setores avaliados na Praia da Tabuba para o ano de 2019.
Fonte: Elaboração dos autores.

Na seção 2, localizada no centro da área de estudo, nota-se novamente uma variação vertical que se inicia na cota de coroamento (distância horizontal de 20 metros) em direção à zona de berma. A variação entre janeiro (tracejado preto) e dezembro (tracejado vermelho) foi de 3,82 metros, demonstrando uma erosão na base da duna e na geração de escarpas, ocasionados quando a linha de espraiamento máximo (shoreline) é alcançada por eventos de alta magnitude. No geral, o perfil analisado apresentou um acrescimento de área submersa (Figura 5), o que acarreta a interpretação da diminuição da faixa praial e, consequentemente, um balanço sedimentar negativo.

Por fim, a seção 3 (Figura 5), localizada no extremo oeste da área analisada, não demonstrou variações verticais significativas no primeiro semestre no ano. Contudo, no segundo semestre, entre as cotas horizontais de 25 a 80 metros identificou-se uma variação vertical bastante evidente, de 4,053 metros para 0,14 metros entre a crista da duna e sua base. Em direção ao estirâncio (cota horizontal de 45 a 80 metros), a variação vertical entre o mês de novembro (perfil azul claro) e dezembro (perfil tracejado vermelho) foi de aproximadamente 2 metros. Essa mudança em curto prazo pode ser explicada devido à ocorrência de ondas swell no período de dezembro, conforme destacado anteriormente. Quanto à diferença entre área emersa e submersa, ambas seguem o mesmo padrão, apresentando ganhos em área emersa no primeiro semestre e sofrendo erosão no segundo.

ISSN: 1982 - 5528
D.O.I: 10.22411/rede2020.1401.11

3.3 Escala de impacto de ondas de tempestade

Os dados oriundos dos perfis topográficos e dos agentes hidrodinâmicos da Praia da Tabuba proporcionaram uma análise, a partir do modelo proposto por Sallenger (2000) e Sallenger *et al.* (2003), da vulnerabilidade das dunas frontais diante da ação das ondas e eventos de alta energia que condicionam cenários extremos, como as ressacas do mar. Desse modo, para cada seção foram avaliados 12 cenários com condições oceanográficas típicas referentes a cada mês de campo, somados a três cenários que apresentaram condições marítimas de alta energia ao longo de 2019. A utilização de dados distintos permitiu a comparação entre diferentes cenários de vulnerabilidade para cada setor estudado.

A seção 1 se caracteriza pela presença de rochas de praia (*beachrocks*) e cascalhos ao longo da sua faixa praial. A duna frontal local não se mostra tão expressiva, com baixa altimetria e confinada entre edificações circundantes, que por sua vez preservam a escarpa de barlavento, mas não apontando uma escarpa de sotavento bem definida do ponto de vista geomorfológico.

No tocante à vulnerabilidade, a seção1 apresentou 80% (símbolos em azul) dos experimentos relativos às condições típicas de onda e maré como regime de *swash*, condição em que o *run-up* das ondas é confinado à região da zona intertidal menor, porém, os dados demonstram tendências ao regime de colisão (Figura 6). Como esperado, os experimentos que utilizaram condições extremas de onda (20%), classificaram a seção 1 em regime de colisão, quando o *run-up* avança até a base da duna, gerando erosão da base e escarpando a duna.

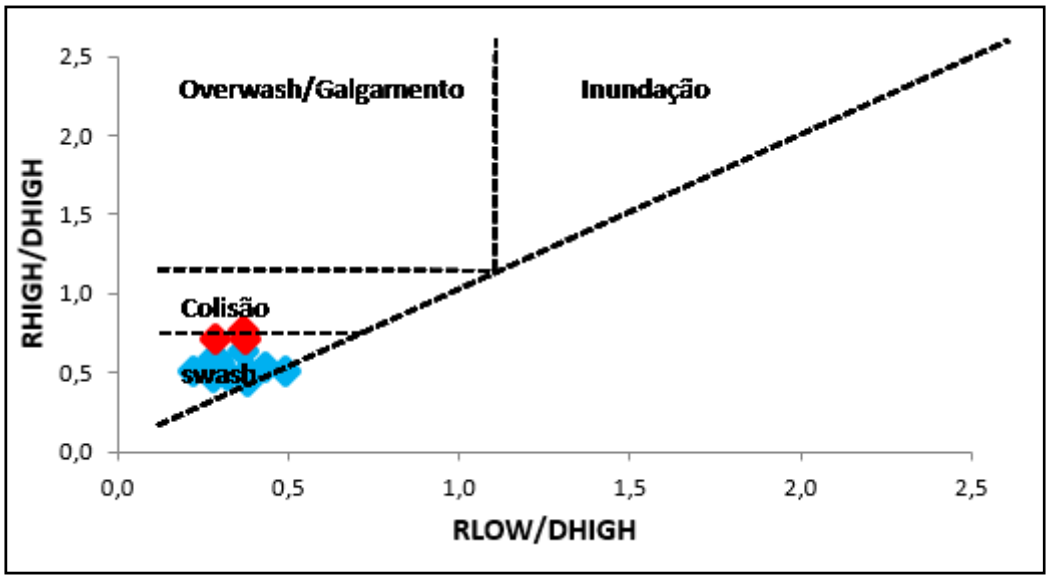


Figura 6. Gráfico das escalas de impactos costeiros proposto por Sallenger (2000) para o setor 1.
Fonte: Elaboração dos autores.

A seção 2 também se caracteriza pela presença de rochas de praia e cascalhos ao longo da faixa praial. Contudo, diferente do setor anterior, a duna frontal não é confinada por obras rígidas em seu entorno, o que facilita a ocorrência de transporte de sedimentos pelos corredores de vento, que elevam a crista da duna. Em vista disso, a duna frontal possui altimetria mais expressiva, com escarpas de barlavento bem visíveis.

ISSN: 1982 - 5528
D.O.I: 10.22411/rede2020.1401.11

A vulnerabilidade da seção 2 (Figura 7) se demonstrou menor que na seção 1: 80% dos experimentos se classificaram em regime de *swash*, e 13% com tendência ao regime de colisão. Apenas 1 experimento (6,33%) alusivo refletiu em um cenário de colisão à ressaca do dia 19 de dezembro, quando ocorreram ondas de Hs de 1,6 metros e Tp de 17 segundos.

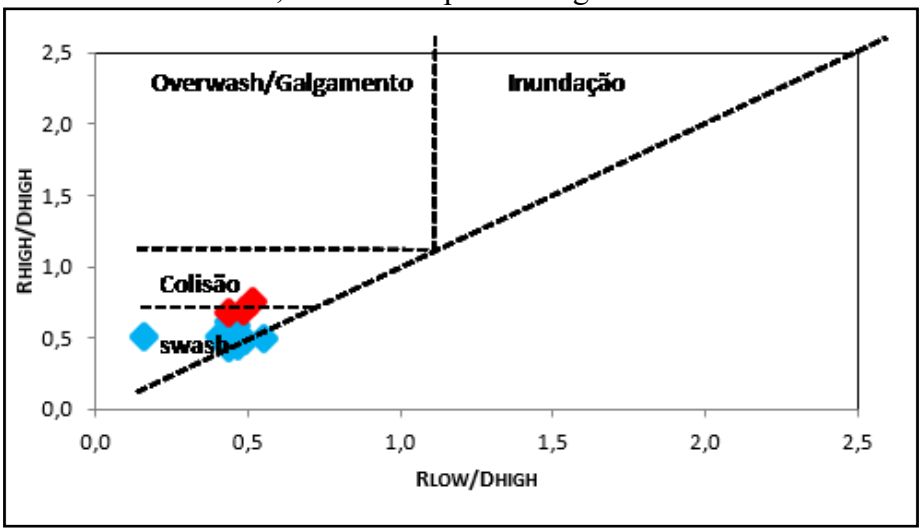


Figura 7. Gráfico das escalas de impactos costeiros proposto por Sallenger (2000) para o setor 2.
Fonte: Elaboração dos autores.

Por fim, a seção 3 apresenta características diferentes das demais seções, não possuindo rochas de praia, sedimentos com textura mais fina e a expressiva presença de vegetação na duna frontal, o que facilita a acumulação de sedimentos em sua crista e reverso. Com relação à vulnerabilidade, a seção 3 se mostrou a menos vulnerável, visto que 80% dos experimentos das condições oceanográficas típicas (símbolos em azul) se enquadraram no regime de *swash*, enquanto os três eventos de alta energia se situaram entre swash e regime de colisão (Figura 8). É possível que o aspecto de maior resiliência do setor esteja associado ao índice expressivo de vegetação na duna.

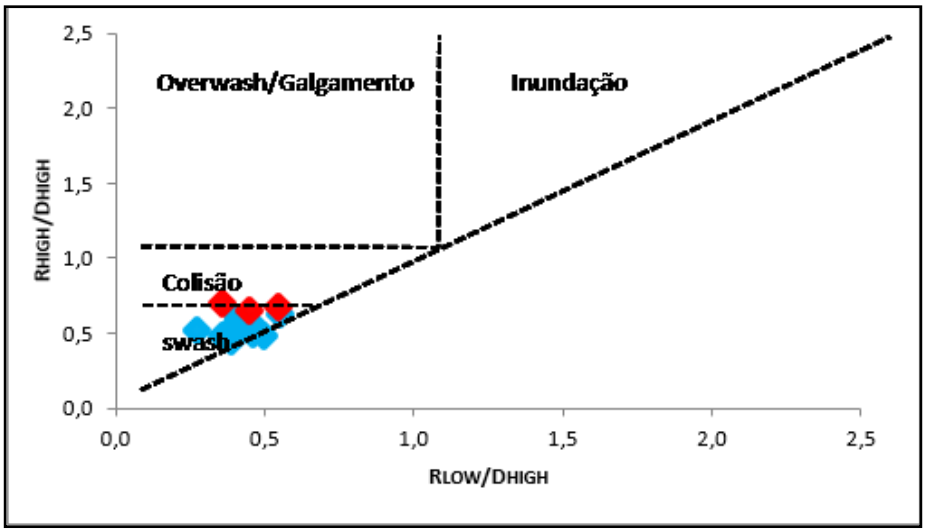


Figura 8. Gráfico das escalas de impactos costeiros proposto por Sallenger (2000) para o setor 3.
Fonte: Elaboração dos autores.

De uma forma geral, as dunas frontais funcionam com anteparo ao avanço do mar nesse

ISSN: 1982 - 5528
D.O.I: 10.22411/rede2020.1401.11

trecho da Praia da Tabuba, atenuando os danos patrimoniais e impedindo que haja destruição dos empreendimentos costeiros tal como ocorre no restante da extensão dessa praia. A morfologia das dunas e a orientação da costa também são elementos importantes na eficiência da proteção costeira exercida pelas dunas, constituindo um elemento importante a ser considerado na gestão costeira do município de Caucaia (CE). Assim, as dunas frontais formam a primeira linha de defesa contra o avanço do mar (ZARNETSKE et al., 2015; BIEL et al., 2017), impedindo que haja galgamentos oceânicos e inundações marinhas ao longo de comunidades litorâneas como da Tabuba.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A erosão da Praia da Tabuba ficou evidente através dos perfis de praia, porém os danos patrimoniais foram atenuados pela existência de um cordão de dunas frontais ainda com boa preservação. A erosão da praia se manifestou nas mudanças na morfologia da praia, com variações verticais negativas que representam uma diminuição do pacote sedimentar da praia, tendo como consequência direta a diminuição da largura da praia. O estudo da morfologia do sistema praia-duna constitui uma importante ferramenta para a avaliação da vulnerabilidade costeira à ação de eventos tempestivos, constituindo um indicador estratégico para o manejo e a gestão de ambientes costeiros em processo de erosão marinha.

Todos os setores monitorados apresentaram resultados distintos de análise ao longo de 2019, o que evidencia a importância de estudos de monitoramento para uma área com tanta dinamicidade como é caracterizada a zona costeira. Nota-se, além disso, em meio aos ecossistemas terrestres e marinhos, a necessidade de uma gestão eficiente que considere as adversidades e as diferentes variáveis que modelam a paisagem costeira.

Ressalta-se, ainda, a importância que a atuação das condicionantes oceanográficas possui no sistema praia-duna da Tabuba, causando alterações na morfologia, textura dos sedimentos e dimensionamento da linha de costa. Isso vale, principalmente, quando eventos de alta energia são considerados na amostra, pois evidenciam sua intensidade e rapidez na mudança da paisagem.

É possível concluir que as dunas frontais desempenham um papel preponderante na proteção da costa contra a ação das ondas, até mesmo contra as mais energéticas como as *swell*. O índice de vulnerabilidade proposto por Sallenger (2000) evidencia a salvaguarda das três seções analisadas, que mesmo apresentando tendências erosivas cumprem sua função, evitando estragos e prejuízos ao patrimônio edificado. Portanto, em um contexto de urbanização desordenada, ocupações irregulares e de erosão costeira, a ocupação de dunas frontais deve ser integralmente desencorajada, a fim de evitar um detrimento ainda maior para a sociedade e a natureza.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico-CNPQ (Bolsa PQ 310246 / 2019-9 e Bolsa de Mestrado) e ao Programa de Pós-Graduação em Geografia (PROPGEO / UECE) pelo apoio. Este estudo contou com o apoio da Fundação Cearense

de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) por meio da FCT AAC nº 02 / SAICT / 2017 (Projeto Abordagem Holística para a simulação da evolução de longo prazo do litoral) e do Laboratório de Geologia Costeira e Geomorfologia e Oceânica da UECE.

REFERÊNCIAS

ASHTON, A. J. P.; DONNELLY and EVANS, R.L. Mitigation and adaptation strategies for global change. Volume 13, Number 7, p. 719-743. 2008.

ANGULO, R. J. Aspectos físicos das dinâmicas de ambientes costeiros, seus usos e conflitos. **Desenvolvimento e meio ambiente**, v. 10, 2004.

BARBOSA, V. M. et al. Estudo morfodinâmico durante uma maré equinocial de sizígia em uma praia de macromaré do litoral amazônico (praia de Ajuruteua-PA, Brasil). **Boletim Paranaense de Geociências**, v. 60, 2007.

BIEL, Reuben G. et al. Coastal protection and conservation on sandy beaches and dunes: context-dependent tradeoffs in ecosystem service supply. **Ecosphere**, v. 8, n. 4, p. e01791, 2017.

BRENNER, O. T. et al. Characterizing storm response and recovery using the beach change envelope: Fire Island, New York. **Geomorphology**, v. 300, p. 189-202, 2018.

CALLIARI, L.J.; KLEIN, A.H.F. Características morfodinâmicas e sedimentológicas das praias oceânicas entre Rio Grande e Chuí, RS. Porto Alegre: **Revista Pesquisas em Geociências**, v.20, p.48-56, 1999.

CARTER, RWG. Impactos do nível do mar em um futuro próximo nas paisagens de dunas costeiras. **Ecologia da paisagem**, v. 6, n. 1-2, pág. 29-39, 1990.

CASTELLE, B. et al. Impact of the winter 2013–2014 series of severe Western Europe storms on a double-barred sandy coast: Beach and dune erosion and megacusp embayments. **Geomorphology**, v. 238, p. 135-148, 2015.

CLARCK, J. Integred Coastal Zone Management – A world wide Challenge to Comprehend – Shoreline and Coastal Waters as Single United. **Sea Tecnology**. V.37. N°6. Virginia. 1996.

DE OLIVEIRA FILHO, S. R; FERNANDEZ, G. B. Monitoramento contínuo de perfis de praia: quantificação da erosão ocasionada por ondas de tempestade e recuperação natural do estoque sedimentar, litoral do Rio de Janeiro. **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**, v. 1, p. 2911-2922, 2017.

DOLAN. R.; DAVIS. R. E. An intensity scale for Atlantic coast northeast storms. **Journal of Coastal Researsh**. v.8(3), p.840- 853, 1992.

FINKL, C. W. Classificação costeira: abordagens sistemáticas a serem consideradas no desenvolvimento de um esquema abrangente. **Journal of Coastal research**, v. 20, n. 1 (201), pág. 166-213, 2004.

HASTENRATH, S. Climate and circulation of the tropics. **Dynamics of Atmospheres and Oceans**, Dordrecht, Vol. 12, n.1, p.312, 1985.

HESP, P.A. Foredunes and blowouts: initiation, geomorphology and dynamics. **Geomorphology**, 48(1-3):245-268. 2002.

HOUSER, Chris. Alongshore variation in the morphology of coastal dunes: Implications for storm response. **Geomorphology**, v. 199, p. 48-61, 2012.

ISSN: 1982 - 5528
D.O.I: 10.22411/rede2020.1401.11

JUDD, L. **Long term dune morphological and shoreline change for beaches in Wollongong**, 2014.

LARSON, M.; ERIKSON, L.; HANSON, H. An analytical model to predict dune erosion due to wave impact. Elsevier. **Coastal Engineering**, 51, 675-696, 2004.

LEE, G. H; NICHOLLS, R. J.; BIRKEMEIER, W. A. Storm-driven variability of the beach-nearshore profile at Duck, North Carolina, USA, 1981–1991. **Marine geology**, v. 148, n. 3-4, p. 163-177, 1998.

LENTZ, Erika E.; HAPKE, Cheryl J. Geologic framework influences on the geomorphology of an anthropogenically modified barrier island: assessment of dune/beach changes at Fire Island, New York. **Geomorphology**, v. 126, n. 1-2, p. 82-96, 2011.

LIMA, R. S. **Vulnerabilidade da linha de costa a eventos de alta energia na Praia da Caponga--Cascavel**, Ceará. 2014.

MAIA, L. P.; FREIRE, G. S. S.; LACERDA, L. D. Accelerated dune migration and aeolian transport during El Nino events along the NE Brazilian coast. **Journal of Coastal Research**, v. 21, n. 6 (216), p. 1121-1126, 2005.

MARTELO, A. F.; NICOLODI, J. L. As dunas frontais e sua função frente às inundações da costa: validação de dois modelos de erosão como ferramenta para a gestão costeira aplicados na praia do Mar Grosso, RS. **Desenvolvimento e Meio ambiente**, v. 44, 2018.

MASSELINK, G.; KROON, A.; DAVIDSON-ARNOTT, R. G. D. Morphodynamics of intertidal bars in wave-dominated coastal settings—a review. **Geomorphology**, v. 73, n. 1-2, p. 33-49, 2006.

MASSELINK, G.; VAN HETEREN, S. Response of wave-dominated and mixed-energy barriers to storms. **Marine Geology**, v. 352, p. 321-347, 2014.

MATIAS, A. et al. Short-term morphodynamics of non-storm overwash. **Marine Geology**, v. 274, n. 1-4, p. 69-84, 2010.

MEIRELES, A. J. A. Impactos ambientais decorrentes da ocupação de áreas reguladoras do aporte de areia: a planície Costeira da Caponga, município de Cascavel, litoral leste cearense. Confins. **Revue franco-brésilienne de géographie/Revista franco-brasilera de geografia**, n. 2, 2008.

MELO, E.; MACHADO, D.M; LISBOA, R.C.; ROMEU, M.A.R. Overview of tide, wind and wave conditions along the Brazilian coast for coastal engineering practice. In: IX PIANCCOPEDEC, 9, 2016, Rio de Janeiro. **Anais**... 18p.

MICALLEF, A; WILLIAMS, A. T. Theoretical strategy considerations for beach management. **Ocean & Coastal Management**, v. 45, n. 4-5, p. 261-275, 2002.

MUSSI, C. S. **Avaliação da sensibilidade ambiental costeira e de risco à elevação média dos oceanos e incidência de ondas de tempestades**: um estudo de caso para a Ilha de Santa Catarina, SC. 2011. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental). Universidade do Vale do Itajaí, 2011.

NEVES, C. F.; MUEHE, D. Vulnerabilidade, impactos e adaptação a mudanças do clima: a zona costeira. **Parcerias estratégicas**, v. 13, n. 27, p. 217-296, 2010.

PIERRI, N. et al. A ocupação e o uso do solo no litoral paranaense: condicionantes, conflitos e tendências. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 13, 2006.

PSUTY, NORBERT P.; PACE, JEFFREY P.; ALLEN, J. R. Coastal foredune displacement and re-

ISSN: 1982 - 5528
D.O.I: 10.22411/rede2020.1401.11

covery, Barrett Beach-Talisman, Fire Island, New York, USA. Z **Geomorphol Suppl**, v. 141, p. 153-168, 2005.

SALLENGER, A. H. 2000. Storm impact scale for Barrier Island. **Journal Coastal Research** 16: 890-895.

SALLENGER, A. H., HOWD, P., STOCKDON, H., GUY, K., MORGAN, K.L.M. On predicting storm-induced coastal change. **Proceedings of the International Conference on Coastal Sediments**, 18-23, 2003.

SCHLACHER, Thomas A. et al. **Sandy beaches at the brink**. Diversity and Distributions, v. 13, n. 5, p. 556-560, 2007.

SHORT, A. D. **Handbook of beach and shoreface morphodynamics**. 1999.

SILVA, A. C. et al. Características das ondas" Sea" e" Swell" observadas no litoral do Ceará-Brasil: variabilidade anual e inter-anual. **Tropical Oceanography**, v. 39, n. 2, p. 123-132, 2011.

STOCKDON, H. F.; HOLMAN, R. A.; HOWD, P. A.; SALLENGER, A. H. Empirical parameterization of setup, swash, and runup. **Coastal Engineering**, v.53, n.7, p.573-588, 2006.

STOCKDON, H. F., et al. A simple model for the spatially-variable coastal response to hurricanes. **Marine Geology**, v. 238, n. 1-4, p. 1-20, 2007.

SUANEZ, S. et al. Observations and predictions of wave runup, extreme water levels, and medium--term dune erosion during storm conditions. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 3, n. 3, p. 674-698, 2015.

WRIGHT, L. D.; SHORT, A. D.; GREEN, M. O. Short-term changes in the morphodynamic states of beaches and surf zones: an empirical predictive model. **Marine geology**, v. 62, n. 3-4, p. 339-364, 1985.

ZEIGLER, J. M.; HAYES, C. R.; TUTTLE, Sherwood D. Beach changes during storms on outer Cape Cod, Massachusetts. **The Journal of Geology**, v. 67, n. 3, p. 318-336, 1959.

ZARNETSKE, Phoebe L. et al. Coastal foredune evolution: the relative influence of vegetation and sand supply in the US Pacific Northwest. **Journal of the royal society interface**, v. 12, n. 106, p. 20150017, 2015.