



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

The Foredunes and Their Function of Protection due Coastal Floods: Validation of Two Erosive Models as a Tool for the Coastal Management Applied at the Beach of Mar Grosso, RS

André Felipe MARTELO^{1*}, João Luis NICOLÓDI¹

¹ Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Rio Grande, RS, Brasil.

*E-mail de contato: andremartelo90@gmail.com

Artigo recebido em 18 de agosto de 2017, versão final aceita em 25 de outubro de 2017.

RESUMO: Desde 2016 o Brasil possui um Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima (PNA). Elaborado pelo Ministério do Meio Ambiente (Brasil, 2016), tal plano busca promover a redução da vulnerabilidade nacional à mudança do clima e a realização de uma gestão do risco associado a esse fenômeno. Tal Plano dá especial atenção às zonas costeiras do país. No Estado do Rio Grande do Sul (RS), a Zona Costeira está sujeita ao impacto de eventos meteorológicos energéticos durante os períodos de outono e inverno. Ressacas do mar e enchentes marinhas são comuns durante e após a passagem desses eventos, colocando pessoas, infraestruturas e ecossistemas em risco. As dunas frontais constituem a primeira linha de defesa natural do continente frente às inundações marinhas e à erosão costeira. Sendo assim, o presente estudo aplica o modelo da Regra de Erosão de Dunas a fim de quantificar a erosão de dunas frontais em uma praia no litoral sul do Rio Grande do Sul (RS). Tal aplicação busca validar este modelo para as praias do RS. A caracterização dos processos erosivos foi realizada com base na Escala de Impacto de Tempestades, categorizando os eventos analisados dentro de quatro categorias. O modelo de erosão de dunas apresentou valores altos de erosão devido às configurações dos parâmetros do modelo, os quais devem ser adaptados para o litoral do RS para melhor aplicabilidade. A aplicação conjugada destes dois modelos tem relevante potencial para uso direto na gestão dos ecossistemas costeiros, visto que, após devidamente adaptados à escala local, inferem as dimensões e características necessárias para que as dunas frontais possam efetivamente cumprir sua função de proteção costeira.

Palavras-chave: dunas; storm surge; zona costeira; erosão costeira; gestão costeira.

ABSTRACT: Since 2016, Brazil has developed the National Adaptation Plan for Climate Changes (PNA, in Portuguese). Elaborated by the Ministry of Environment (Brasil, 2016) this plan intends to reduce the national vulnerability due to climate changes and the implementation of risk management associated to this phenomenon. This Plan gives special attention to the coastal zones of the country. In the state of Rio Grande do Sul (RS), the Coastal Zone is subject to the impact of high-energy meteorological events during autumn and winter period. Storm surges and floods are common during and after the passage of these events, putting people, infrastructure and ecosystems in danger. The foredunes constitute the continent's first line of natural defense against the ocean's floods and coastal erosion. Therefore, the present study applies the Dune Erosion Rule's model in order to quantify the foredunes' erosion on the south shoreline of Rio Grande do Sul State (RS). This application seeks to validate the model for the beaches of RS. The performed characterization of the erosion process was based on the Storm Impact Scale, categorizing the analyzed events within four categories. The dune erosion model had shown high values of dune erosion due to the configuration of the used parameters, which must be modified in order to improve its applicability on the shoreline of RS. The combined application of these two models has relevant potential for direct use in the management of coastal ecosystems, since after being properly adapted to the local scale, it infers in the necessary dimensions and characteristics so that the foredunes can effectively fulfill the function of coastal protection.

Keywords: dunes; storm surge; coastal zone; coastal erosion; coastal management.

1. Introdução

A importância da Zona Costeira (ZC) caracteriza-se não só pelo mosaico de ecossistemas que abrigam uma enorme biodiversidade de fauna e flora, mas também pelos aspectos de interesse econômico à população humana.

Dias (2005) caracteriza a ZC como um ambiente complexo devido à interação entre hidrosfera, litosfera, atmosfera e biosfera. Sua variabilidade e potencial ecossistêmico resultam destas interações entre diferentes ambientes, em que a mínima alteração dos parâmetros que a mantêm pode resultar em grandes modificações no sistema como um todo.

Definida no parágrafo 4 do artigo 225 da Constituição Federal de 1988 como patrimônio nacional, deve ser preservada sob a ótica do meio ambiente e do uso de seus recursos naturais.

Por ser um ambiente transicional, diferentes processos moldam a ZC, como, por exemplo, ven-

tos fortes, correntes marinhas, desembocaduras de rios e estruturas antrópicas. A erosão costeira é uma consequência desses processos modeladores, principalmente quando nos referimos à elevação do nível médio do mar. Quando associada a eventos meteorológicos, essa elevação do nível do mar recebe o nome genérico de *storm surge*, o qual é uma combinação da subida da maré meteorológica, das ondas de tempestade induzidas pelo vento e dos efeitos de pressão atmosférica (Benavente *et. al.* 2006).

Segundo Souza (2009), a erosão costeira natural pode ser condicionada pelos seguintes fatores: dinâmica da circulação costeira (transporte litorâneo), estágio morfodinâmico da praia (com tendência erosiva), aporte sedimentar insuficiente ou ausente, armadilhas de sedimento (fossas naturais ou artificiais) e atuação de sistemas frontais e ciclones causando elevação do nível do mar (retirando sedimento da praia/das dunas e carregando

em direção ao mar).

Muitas atividades antrópicas na ZC podem provocar a redução do suprimento de sedimentos e, conseqüentemente, induzir erosão costeira e recuo da linha de costa. Além das atividades mais conhecidas, como construção de barragens, dragagens, molhes, obras de proteção costeira, as atividades no interior do continente também interferem no balanço sedimentar da ZC, como intensa atividade agrícola e desmatamento de matas ciliares Dias (2005).

Vellinga (1982), estudando áreas baixas da costa da Holanda, mostrou a importância da elaboração e das previsões dos modelos erosivos para o sistema praia-duna como função de proteção costeira. Dessa forma, o estudo de Vellinga (1982) teve como foco entender o quão largo teria de ser esse campo de dunas para resistir a intensos eventos climáticos que elevam o nível do mar e, causando erosão das dunas frontais, podem provocar inundações no continente.

Sallenger (2000), como será apresentado na metodologia, desenvolveu uma nova escala para classificar os impactos de tempestades sobre o sistema duna-praia, intensificando os estudos e a preocupação da comunidade científica ante a vulnerabilidade das dunas frente aos intensos eventos meteorológicos.

No Brasil, o Ministério do Meio Ambiente tem dado especial atenção a esta temática, com foco na adaptação às mudanças do clima. Um indicativo de tal importância é a promulgação do Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima (PNA), em 2016. Este plano busca a promoção da redução da vulnerabilidade nacional à mudança do clima e a realização de uma gestão do risco associado a esse fenômeno.

No âmbito da Gestão Integrada da Zona Costeira (GIZC), o desenvolvimento de mecanismos que possam auxiliar na manutenção dos serviços ecossistêmicos dessa porção do território é crucial. Klein *et al.* (1998) já afirmavam que, para aperfeiçoar a GIZC, é necessária maior compreensão dessa dinâmica dos ecossistemas costeiros e como a ZC responde aos processos antrópicos e naturais que atingem em diferentes escalas espaciais e temporais.

Com isso, o presente estudo aplica um modelo quantitativo de erosão de dunas (estimando a área de duna erodida) e um modelo qualitativo que classifica os processos erosivos em categorias.

O sistema duna-praia escolhido para a realização do estudo foi a Praia do Mar Grosso, localizada no município de São José do Norte, Rio Grande do Sul (RS). O mesmo estudo ainda identifica as possíveis adequações necessárias para melhorar a acurácia de um dos modelos para áreas de estudo como a do presente trabalho.

2. O estudo das dunas frontais

As dunas costeiras são ecossistemas frágeis e seu desenvolvimento, criação e desaparecimento são controlados por fatores naturais, ao longo do tempo geológico, e fatores antrópicos mais recentes, devido à ocupação da ZC (Nicolodi & Cretella, 2009). As dunas frontais são definidas como cordões de dunas arenosos paralelos à linha de praia e formados por transporte eólico de areia e por vezes com vegetação associada. Recebem diversos nomes na literatura (*beach ridges*, *parallel beach ridges*), porém, de maneira geral, sua classificação se divide em duas categorias: dunas frontais incipientes, mais conhecidas como dunas

embrionárias, e dunas frontais estabelecidas (Hesp, 2002), dentro das quais ainda podem receber outras classificações morfológicas.

As dunas incipientes são as primeiras a se formarem (por isso o nome dunas embrionárias). À medida que os sedimentos finos são carregados pelo vento, estes encontram obstáculos, geralmente plantas individuais ou grupos de gramíneas, os quais retêm esses sedimentos, servindo como substrato para o crescimento dessas primeiras dunas (Hesp, 2002). Podem ser sazonais, crescendo durante períodos com eventos meteorológicos menos intensos e sendo erodidas durante a passagem de eventos de intensa energia, que provocam a elevação momentânea do nível do mar (*storm surge*).

Mostrando que as dunas estabelecidas se diferenciam das incipientes pelo tipo de vegetação que as compõem, Hesp (2002) demonstrou que as dunas evoluem do estágio embrionário, migrando em direção ao continente; dessa forma, são constituídas por gramíneas mais robustas e até pequenos arbustos característicos da região em que se encontram.

Segundo Hesp (2002), o desenvolvimento e a evolução das dunas frontais estabelecidas devem-se à combinação de inúmeros fatores, como: (1) a fonte de areia; (2) o grau de cobertura vegetal; (3) as espécies vegetais; (4) taxas de acreção e erosão eólicas; (5) frequência e magnitude das ondas e ventos; (6) ocorrência e magnitude da erosão por tempestades, escarpamento das dunas e processo de cobrimento das dunas pelo mar (*overwash* ou galgamento oceânico¹); (7) o estágio praiial a médio-longo termo (estável, erodindo, acrescendo); (8) o nível da água do estuário, lago, mar adjacente; e (9) o impacto e o uso humano dessas dunas.

Segundo Larson *et al.* (2004), as dunas costeiras constituem a primeira linha de defesa do continente contra a incidência de grandes ondas e elevações do nível da água do mar durante a passagem de tempestades (*storm surge*). Dessa forma, apresentam potencial para garantir a segurança de propriedades e pessoas que habitam a região adjacente ao campo de dunas.

Baseando-se nos estudos feitos por Vellinga e com o auxílio de um modelo de sua própria autoria (CROSMOR), Van Rijn (2008a) elaborou um modelo matemático nomeado *Dune Erosion Rule* ou Regra da Erosão de Dunas (RED). Com esse modelo, o autor encontrou um método para quantificar a erosão de dunas em um determinado local, comparando as variáveis locais com variáveis pre-determinadas baseadas em um caso de referência, que podem ser encontradas em Van Rijn (2008a).

A fim de apresentar uma abordagem qualitativa aos processos erosivos em dunas frontais, Sallenger (2000) mostrou que o impacto gerado pela ação das ondas devido a uma tempestade não deveria ser o único parâmetro a ser analisado para avaliar a escala do impacto dessas tempestades na praia.

Sallenger (2000) afirma que a geometria vertical da barreira terrestre (dunas) também é fator decisivo na caracterização do impacto de uma tempestade na praia. Dessa forma, uma nova escala de impacto foi criada, a Escala de Impacto de Tempestade (*Storm Impact Scale*), a qual, relacionando o tamanho das dunas com as alturas máximas e mínimas do *swash*, classificou os eventos erosivos em quatro categorias as quais serão apresentadas adiante.

¹Fenômeno em que o nível médio do mar é elevado momentaneamente e ultrapassa dunas e estruturas fixas, como molhes e muros de contenção.

3. Área de estudo

Garantida por uma extensa e rasa plataforma continental, a costa do Rio Grande do Sul foi moldada pelas variações do nível do mar, o qual regrediu de maneira lenta ao longo dos últimos 100.000 anos. Essa lenta regressão do nível do mar deu origem na região costeira do estado a um sistema de ilha-barreira (Villwock & Tomazelli, 1995).

Três dessas barreiras arenosas foram formadas durante o Pleistoceno. A última, barreira IV, de idade holocênica, compõe a atual formação encontrada na zona costeira de todo o Estado (Villwock & Tomazelli, 1995).

As praias arenosas que se formaram no litoral sul do Brasil são retilíneas e se diferem da costa dos outros estados por não apresentarem reentrâncias morfológicas. Tal característica é típica de um local onde o efeito das ondas predomina sobre o efeito das marés (Calliari *et al.*, 2006).

Associados a essas praias encontramos estabelecidos campos de dunas, os quais se mantêm sob condições de formação durante períodos de calma-ria, sendo que, durante períodos com ocorrência frequente de eventos de grande energia, os mesmos podem ser erodidos, perdendo os sedimentos para os depósitos subaquáticos nas barras da zona de surfe ou sendo depositados nas adjacências das dunas (De Oliveira & Calliari, 2006).

A área de estudo deste trabalho está definida na praia do Mar Grosso, a qual localiza-se no município de São José do Norte, litoral sul do Rio Grande do Sul, nas adjacências da desembocadura do estuário da Lagoa dos Patos. O balneário está localizado a uma distância de aproximadamente 12,5 quilômetros do molhe leste da Barra de Rio

Grande. A área escolhida para realização do perfil de praia está localizada a 5,6 quilômetros do centro do balneário e a 6,9 quilômetros do molhe leste (Figura 1).

Segundo Villwock & Tomazelli (1995), esta praia está situada sobre a barreira IV, correspondente ao mais recente sistema deposicional da costa durante a última transgressão marinha.

Assim como as praias adjacentes, ela se caracteriza pela presença de um sistema de dunas frontais estabelecidas com vegetação associada e sazonalidade na presença de dunas incipientes, as quais podem ser “varridas” em direção ao oceano durante a passagem de eventos de intensa energia (De Oliveira & Calliari, 2006).

A praia está orientada geograficamente na direção NE - SW, sendo a sazonalidade do regime de ventos a característica mais marcante da região. Durante o verão, há o predomínio dos ventos de NE e um número reduzido de eventos de intensa energia, contribuindo para o crescimento do campo de dunas. Já nos meses de inverno o predomínio dos ventos é do quadrante Sul, os quais estão associados à chegada de frentes frias e eventos de intensa energia capazes de erodir as dunas frontais, depositando assim o sedimento erodido nas bancadas submersas da zona de surfe (Machado & Calliari, 2016).

A difração sofrida pelas ondas quando encontram o molhe resulta na diminuição da altura de onda nos primeiros 800 metros de praia próximos à estrutura, formando assim uma corrente capaz de transportar o sedimento em direção à mesma (NE -SW). O local para realização dos perfis de praia foi escolhido por estar fora da zona de influência do molhe leste.

A maré astronômica, condicionada pela influ-

ência da lua, influencia muito pouco nas flutuações do nível do mar na área de estudo² (cerca de 0.1 a 0.4 m), sendo a maré meteorológica muito mais expressiva (De Oliveira & Calliari, 2006).



FIGURA 1 – O corpo hídrico de tom escuro na porção central da imagem é o estuário da Lagoa dos Patos. Ao sul da imagem estão os molhes da barra, conectando o estuário ao oceano Atlântico. O ponto vermelho indica a localização dos perfis de praia obtidos na praia do Mar Grosso, localizada no município de São José do Norte, margem direita do estuário (topo da imagem). Na margem esquerda encontra-se o município de Rio Grande.

FONTE: Google Earth. Sensor WorldView-2, resolução espacial multiespectral de 2 metros.

Durante o inverno, o avanço dos centros de baixa pressão em direção à costa, somado à orien-

tação da mesma (NE-SW), propicia o transporte lateral de Ekman em direção ao continente (esse transporte é resultado do efeito de Corioli, que atua sobre os oceanos). No Hemisfério Sul, esse transporte ocorre à esquerda da direção do vento. A combinação desses fatores resulta em uma elevação do nível do mar maior do que a prevista na tábua de marés (De Oliveira & Calliari, 2006).

Quanto à incidência de ondas, Fontoura *et al.* (2013) apresentaram que a incidência de ondas na zona de arrebentação frente à área de estudo é por ondulações oriundas de Sul e Sudeste, com 80% e 20% da distribuição das ondas incidentes, respectivamente, sendo as ondulações incidentes de Nordeste mais expressivas em águas mais profundas, com até 30% da distribuição. O mesmo estudo mostrou forte convergência entre os ventos locais e a incidência da ondulação, a qual está associada aos eventos altamente energéticos que passam pela costa.

A sazonalidade dos ventos na região reflete um transporte bidirecional do sedimento. Nos meses de verão, observa-se que a praia tende a ficar mais larga, pois há o depósito dos sedimentos nas dunas, caracterizando um período acrescivo, com ventos oriundos de Nordeste. Já nos meses de inverno, a combinação de ventos do quadrante Sul e de ondulações do mesmo quadrante pode provocar erosão das dunas embrionárias e até das dunas frontais em casos da passagem de eventos mais extremos, como a passagem de ciclones extratropicais (De Oliveira & Calliari, 2006).

O balneário foi escolhido para a realização deste estudo com fins didáticos e para melhor logística das saídas de campo. Dessa forma, o estudo

² <<http://www.tabuademales.com/br/rio-grande-do-sul/porto-do-rio-grande>>.

aqui apresentado deve ser expandido para regiões com maior ocupação urbana, a fim de se quantificar o risco ambiental desses locais frente à erosão, por meio da metodologia apresentada.

4. Metodologia

4.1. Regra da Erosão de Dunas (*Dune erosion rule*)

Apoiando-se nos estudos de Vellinga (1982), nos quais a realização dos experimentos é feita em pequena e grande escala para estimar a elevação do nível do mar e a erosão ocasionada pelas ondas, Van Rijn (2008a) elaborou uma equação geral para o cálculo da erosão de dunas. Os estudos realizados por Vellinga (1982) constaram de experimentos em campo e laboratoriais e, ainda, as variáveis utilizadas no estudo servem como referência nas relações calculadas pela equação de Van Rijn (2008b).

Van Rijn (2008b), utilizando-se de um modelo de sua própria autoria, o CROSMOR, o qual utiliza três principais processos condicionantes de erosão das dunas costeiras: (1) os efeitos de ondas de baixa frequência, (2) a turbulência gerada pela quebra das ondas de colisão e (3) o impacto direto destas nas dunas, desenvolve então uma equação geral para a quantificação da erosão em dunas frontais (Equação 1). O mesmo estudo ainda considera um tempo mínimo de duração das tempestades de 5 horas para se obter os melhores resultados. A equação proposta por Van Rijn (2008a) resultou em uma área erodida de duna acima do *storm surge* após 5 horas e está discriminada a seguir:

$$A_{d,t=5} = A_{d,ref} (d_{50,ref}/d_{50})^{\alpha_1} (S/S_{ref})^{\alpha_2} (H_s/H_{s,ref})^{\alpha_3} (T_p/T_{p,ref})^{\alpha_4} (\tan\beta/\tan\beta_{ref})^{\alpha_5} (1+\theta_0/100)^{\alpha_6} \quad (1)$$

Onde,

$A_{d,t=5}$ área erodida na duna depois de 5 h ($m^3 \cdot m^{-1}$);

$A_{d,ref}$ área erodida na duna depois de 5 h no caso de referência = 170 ($m^3 \cdot m^{-1}$);

S *storm surge* (m);

S_{ref} *storm surge* no caso de referência = 5 m;

$H_{s,o}$ altura significativa de onda *offshore* (m);

$H_{s,o,ref}$ altura significativa no caso de referência = 7.6 m;

T_p período de pico das ondas *offshore* (s);

$T_{p,ref}$ período de pico no caso de referência = 12 s;

d_{50} diâmetro mediano do material (m);

$d_{50,ref}$ diâmetro mediano do material no caso de referência = 0.000225 m;

$\tan\beta$ declividade do perfil entre os -3 m e a base da duna (+3m);

$\tan\beta_{ref}$ declividade do perfil entre os -3 m e a base da duna (+3m) no caso de referência = 0.0222 (1 a 45);

θ_0 ângulo de incidência das ondas em relação à normal (graus);

α_1 expoente = 1.3;

α_2 expoente = 1.3 para $S < S_{ref}$ e $\alpha_2 = 0.5$ para $S > S_{ref}$;

$\alpha_3 \alpha_4 = \alpha_6 = 0.5$ (expoentes);

α_5 expoente = 0.3.

O tamanho médio do grão do sedimento do Mar Grosso se encontra no intervalo entre 3 e 2.5 *phi* e as variações do tamanho médio são resultantes da circulação local condicionada pela presença do molhe (Figueiredo & Calliari, 2006). O diâmetro de 0.000125 m (125 μm), obtido de Figueiredo &

Calliari (2006), foi utilizado na RED para o parâmetro do sedimento.

Por meio da Equação 1, podemos obter a área de duna erodida acima do *Storm Surge* durante as 5 horas mais intensas do evento em questão (tempestades, ciclones, frentes frias).

4.2. Perfis de praia

A medição do perfil praiial permite a análise do volume real erodido da praia e dunas após a passagem de tempestades. Além disso, podemos obter também a declividade praiial, variável importante para a aplicação da RED.

No dia 25 de março de 2016, foi instalado um marco de concreto de 1,5 m de comprimento no topo da duna frontal estabelecida. Este marco indica o local onde foram realizados todos os perfis de praia para este trabalho. A localização deste marco é nas coordenadas UTM 402587.39 E, 6448627.19 N, 22H (Figura 1).

Os perfis foram medidos com uma estação total LINERTEC®. Os perfis eram medidos de acordo com as condições atmosféricas e oceânicas do dia. Dessa forma, em dias nos quais o mar estava mais próximo das dunas, os perfis apresentam menor comprimento do que os medidos em dias de mar recuado. Vale lembrar que o tamanho dos perfis não influencia na estimação da área de duna erodida, pois o perfil considerado pela equação é apenas o perfil da duna e não o perfil de praia.

Os perfis de praia medidos serviram como forma de validação para os resultados apresentados pelo modelo no referido estudo, seguindo a mesma metodologia aplicada por Van Rijn (2008a) (Figura 2).

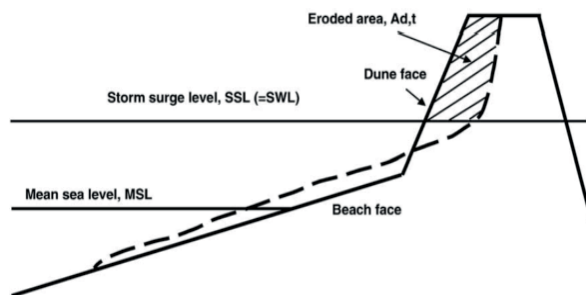


FIGURA 2 – Esboço de um perfil praiial exemplificando a área de duna erodida considerada pela Equação 1, a qual é comparada com a mesma área calculada nos dados obtidos pelos perfis de praia deste estudo.

FONTE: Van Rijn (2008a).

Van Rijn (2008a) definiu o cálculo da declividade praiial de seu estudo como sendo a declividade entre +3 m (crista da duna frontal) e -3 m de profundidade. No presente trabalho, a declividade foi calculada da crista da duna (altura em que o marco está instalado) até o final dos perfis, os quais não passaram de 2 m de profundidade pela falta de equipamento adequado para a coleta dos dados até os -3 m. A declividade praiial definida para ser aplicada na RED é a declividade do perfil pré de cada evento.

4.3. Obtenção dos dados hidrodinâmicos

As variáveis hidrodinâmicas foram adquiridas no *website* do programa Rede Ondas (<http://redeondas.furg.br>), coordenado pela Universidade Federal do Rio Grande e integrado ao programa GOOS-Brasil (Global Ocean Observing System - Brasil). Os dados de altura significativa, período e direção de incidência da ondulação são coletados por um ondógrafo fundeado a 17 m de profundida-

de, localizado nas coordenadas UTM 449549.62 E, 6436904.08 N, 22H, em frente ao canal de acesso da barra de Rio Grande.

As principais variáveis consideradas neste estudo são: as condições de incidência da ondulação (altura significativa de onda, H_s), período (T_p) e ângulo de incidência (Dir), avaliação do nível do mar (n) durante a passagem dos eventos extremos e a duração dos mesmos. No presente estudo, serão descartadas as variáveis eólicas (efeito do vento local) sobre as dunas, considerando apenas as variações sob as condições hidrodinâmicas listadas acima a fim de se aproximar da metodologia utilizada pelo modelo matemático da RED desenvolvido por Van Rijn.

Os valores de H_s , T_p e Dir foram obtidos por meio da média de cada variável durante as 5 horas mais intensas de cada evento.

A elevação nível do mar sob efeito de eventos meteorológicos altamente energéticos subtraída da maré astronômica nos define o *storm surge*. Definir o *storm surge* pode ser uma tarefa complexa, uma vez que são muitas as variáveis que influenciam em sua estimativa matemática.

Além da maré astronômica, deve-se considerar as marés meteorológicas, além de variações eustáticas que podem influenciar localmente o nível médio do mar. Judge *et al.* (2003) relatam dificuldades semelhantes para essa definição na costa leste dos Estados Unidos, principalmente durante a passagem dos furacões Dennis e Floyd em 1999 e Fran em 2000, quando os equipamentos (marégrafos) falharam na medição dos dados durante a passagem dos furacões.

Para o presente trabalho, não foram encontra-

dos dados locais de nível do mar para o cálculo do *storm surge*. Dessa forma, outras abordagens foram testadas: (1) Adaptação do modelo analítico de Benavente *et al.* (2006), considerando a elevação causada pelo vento, ondas, variação de pressão atmosférica e maré astronômica; (2) Alteração realizada no cálculo da elevação causada pelo vento dentro do modelo proposto por Benavente *et al.* (2006); (3) Equação proposta por Komar (1998) para cálculo do *set up* das ondas e *storm surge*; e (4) valores hipotéticos estabelecidos para o *storm surge*, com base na literatura específica para a região (Almeida *et al.*, 1999).

Como o foco deste estudo não é o entendimento e a adaptação das equações de cálculo de elevação de nível do mar, maiores informações sobre esses métodos podem ser encontradas nos referidos estudos (Komar, 1998; Benavente *et al.* 2006).

A velocidade do vento superficial ($m.s^{-1}$) e a pressão atmosférica (hPa), utilizadas nos modelos citados acima para cálculo da elevação do nível do mar, foram obtidas no *website* do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET)³.

4.4. Escala de Impacto de Tempestades (*Storm Impact Scale*)

Sallenger (2000) desenvolveu uma escala que divide os impactos de tempestades em categorias para as praias do tipo ilhas-barreiras frente à incidência de eventos de intensa energia. Esse indicador tem como base o *runup* (máximo alcance vertical do *swash*) das ondas de tempestade e sua relação com a geometria do campo de dunas frontais, sendo

³<<http://www.inmet.gov.br/portal/>>.

diferente dos antigos indicadores, os quais apenas consideravam os processos de elevação do nível do mar (Sallenger, 2000). Assim, o autor propõe quatro condições que representam diferentes níveis de impacto em função dos padrões de magnitude de erosão devido à passagem de tempestades, como é observado na Tabela 1.

O número de Iribarren é um parâmetro usado em estudos de dinâmica de fluidos e engenharia costeira. É um parâmetro adimensional relacionado com a reflexão da onda e o *runup* na costa, uma parametrização do efeito de quebra das ondas quando chegam à costa. É uma variável bastante utilizada na estimativa do *storm surge* durante a passagem dos

TABELA 1 – Categorias de processos erosivos estabelecidos por Sallenger na elaboração da Escala de Impacto de Tempestades.

Regime erosivo	Características
<i>Swash</i> (Espriamento)	Condição em que o <i>runup</i> das ondas é confinado a região do foreshore delimitado pela berma praial quando presente.
<i>Collision</i> (Colisão)	O <i>runup</i> avança até a base das dunas, o impacto das ondas gera escarpas geralmente visíveis após as tempestades.
<i>Overwash</i> (Sobrelavagem)	O <i>runup</i> continua a subir e excede as dunas frontais, iniciando os depósitos sedimentares em direção ao continente.
<i>Inundation</i> (Inundação)	Completa e contínua inundação das áreas baixas ao redor das dunas. O transporte de sedimentos se dá em direção ao continente e ocorrem depósitos acentuados nas adjacências da parte de trás das dunas.

FONTE: Traduzido de Sallenger (2000).

Para chegar a essas classificações teóricas, Sallenger (2000) utilizou relações empíricas para o cálculo do *runup* e do *swash* (ambos com 2% do excedente), segundo as Equações 2 e 3 definidas por Holman e Sallenger (1986) em testes laboratoriais:

$$R2 \% = H_0 (0.83\xi + 0.2) \quad (2)$$

$$S2 \% = H_0 (0.85\xi + 0.06) \quad (3)$$

Onde:

R2 e S2 representam o excedente de 2% tanto para o *runup* quanto para o *swash*, respectivamente;

H_0 = altura significativa de ondas em profundidade;

ξ = número de Iribarren.

eventos meteorológicos (Vellinga, 1982).

O número de Iribarren é definido segundo a Equação 4.

$$\xi = \tan\beta (H_0 / L_0)^{0.5} \quad (4)$$

Onde:

$\tan\beta$ = declividade da face praial;

H_0 = altura significativa de ondas *offshore*;

L_0 = comprimento de onda: ($L_0 = (g / 2\pi) * T^2$), onde g é a constante gravitacional e T o período da onda.

A face praial no presente estudo é definida pela região de espriamento das ondas (entre o *swash* mínimo e máximo) confinada pela berma praial.

O cálculo de *runup* máximo (R_{High}) durante uma tempestade é representado pela Equação 5:

$$R_{High} = R2\% + \eta \bar{\eta} \quad (5)$$

Onde:

$\eta \bar{\eta}$ = nível médio do mar incluindo as marés.

Para o cálculo do *runup* mínimo (R_{Low}), no qual a praia é considerada continuamente subaquática, foi utilizada a Equação 6:

$$R_{Low} = R_{High} - S2\% \quad (6)$$

A posição das feições de R_{High} e R_{Low} e a altura da crista (D_{High}) e da base da duna (D_{Low}) são mostradas na Figura 3.

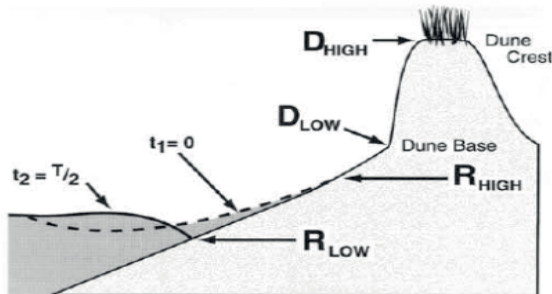


FIGURA 3 – Variáveis utilizadas por Sallenger (2000) para definir os níveis de erosão.

FONTE: Sallenger (2000).

Onde D_{High} é a crista da duna, D_{Low} é a base da duna e R_{High} e R_{Low} representam o alcance máximo e mínimo, respectivamente, do *runup*. Lembrando que R_{Low} considera a parte da praia que está sempre submersa.

Considerando as variações relativas de ambos R_{High} e R_{Low} com D_{High} e D_{Low} , Sallenger estabeleceu uma série de regimes de impactos caracterizados agora por essas relações mostradas na Tabela 2.

O modelo apresentado pretende classificar, de maneira qualitativa, os regimes erosivos que atingem as dunas dentro das quatro categorias propostas por Sallenger (2000) para o período estudado neste trabalho.

A metodologia proposta por Sallenger (2000) será a mesma utilizada neste trabalho, pois as características da área de estudo são similares, porém, tal metodologia é passível de ser adaptada para outros tipos de praias, como as praias de embaçamento da Ilha de Santa Catarina, Brasil, nas quais a metodologia da Escala de Impacto de Tempestades foi alterada para responder melhor às características da área de estudo (Klein, 2016).

TABELA 2 – Relações entre as feições da duna e o *runup*

Relações entre R_{High}/D_{High} e R_{Low}/D_{High}	Regime erosivo
$R_{High}/D_{High} = 0$ para D_{Low}/D_{High}	<i>Swash</i>
$R_{High}/D_{High} = D_{Low}/D_{High}$ para 1	<i>Collision</i>
$R_{High}/D_{High} > 1$ e $R_{Low}/D_{High} < 1$	<i>Overwash</i>
$R_{High}/D_{High} < 1$ e $R_{Low}/D_{High} > 1$	<i>Inundation</i>

FONTE: Sallenger (2000).

4.5. Cálculo da retração horizontal de duna

A partir do resultado da RED ($A_{d,t=5}$), podemos obter as retrações horizontais média e total das dunas depois da passagem de um evento meteorológico intenso. A retração horizontal média pode ser estimada com a Equação 7, sabendo que h_d é a altura da crista da duna acima do nível médio do mar e S representa o *storm surge*.

$$R_d = A_{d,t=5} / (h_d - S) \quad (7)$$

A máxima retração horizontal de duna durante o *storm surge* (R_{dmax}) pode ser estimada a partir da Equação 7, como é mostrada na Equação 8.

$$R_{dmax} \approx 1.5 (R_d) \quad (8)$$

5. Resultados e discussão

Analisando a evolução do perfil praial entre março e novembro de 2016 (Figura 4), é visualmente notável a tendência erosiva da praia. Porém, percebe-se também que as dunas frontais resistiram à colisão das ondas, concordando com Larson *et al.* (2004), quando estes apontam a função protetora das dunas ante inundações da costa.

É notável também a intensidade do último evento (27-28 de outubro), representado na Figura 4 pela linha vermelha. Nota-se que ação das ondas retirou grande quantidade de sedimento da face de praia, mas as dunas continuaram mantendo sua formação próxima da inicial (25/03).

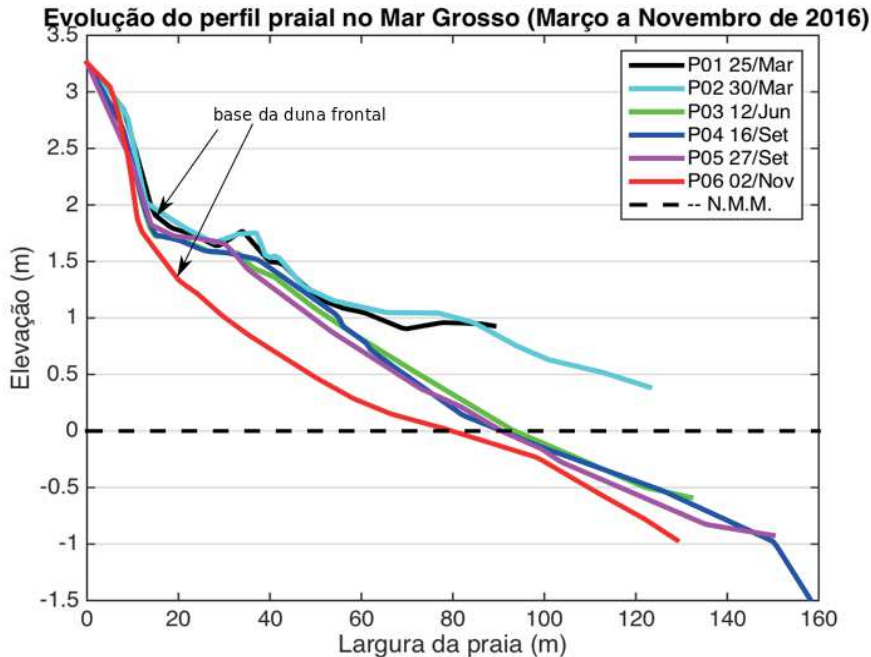


FIGURA 4 – Série temporal do perfil praial do Mar Grosso para o período de outono-primavera de 2016. O nível médio do mar (N.M.M.) foi estabelecido na medida do quarto perfil P04 (16 de setembro) devido às boas condições para definição da linha d'água local, feita com base na linha de máximo e mínimo *swash*.

A estabilidade do cordão de dunas foi de suma importância para a proteção da ZC adjacente às dunas no Mar Grosso. Evidências em campo, como a formação de *blowouts* (quando o oceano erode um ponto específico das dunas), comprovam que, se as dunas não estivessem presentes, a inundação de terras adjacentes seria inevitável.

A obtenção de valores concretos de *storm surge* para cada evento foi uma tarefa complexa. A tentativa de estimar essa variável utilizando diferentes fontes na literatura resultou em valores discrepantes entre si. Conforme se comparavam os

TABELA 3 – Valores médios de altura significativa (Hs), período (Tp) e direção da ondulação durante 5 horas da passagem de cada evento meteorológico. O quadrante da direção da ondulação é apresentado entre parênteses

	Hs	Tp	Direção da ondulação
26 de Março	5.4 m	9.8 s	119.64° (ESE)
10 de Junho	-	-	-
14 de Setembro	2.13 m	12.31 s	163.67° (SSE)
24 de Setembro	4.9 m	13.37 s	184° (S)
28 de Outubro	4.93 m	15.86 s	135.14° (SE)

valores calculados à geometria do perfil pós cada evento, notava-se que alguns valores superestimavam a linha do *storm surge*, enquanto outros apresentavam valores muito mais baixos.

Assim, a aquisição de dados de um marégrafo local faz-se necessária para melhor acurácia no cálculo dessa variável que, segundo Van Rijn (2008a), é a mais expressiva na quantificação da erosão de dunas pelo modelo da RED.

Na Tabela 3, são apresentados os dados de Hs, Tp e direção da ondulação obtidos para cada even-

to a partir dos dados do ondógrafo anteriormente mencionado. Os valores apresentados na Tabela 3 representam médias dos parâmetros dentro de um período de cinco horas de atuação dos maiores valores de Hs e Tp. Esses dados foram utilizados tanto para o cálculo do *storm surge* como também para *input* das mesmas variáveis na equação da RED.

Os valores de *storm surge* para o evento do dia 10 de Junho não puderam ser calculados pelos métodos 01, 02 pela indisponibilidade dos dados para todo o mês de Junho pela plataforma do INMET (Tabela 4). Apenas com o método 03 (Komar, 1998) foi possível realizar o cálculo do *storm surge* para este evento, pois este método baseia-se apenas em variáveis hidrodinâmicas (Hs e Tp) e não atmosféricas (pressão atmosférica e velocidade do vento).

O método 03 não foi escolhido porque implicaria em uma quantificação de erosão de praticamente toda a praia e não apenas do campo de dunas frontais. Aplicando os valores de *storm surge* apresentados na Tabela 4 na equação da RED, obtemos os respectivos valores de área erodida acima do *storm surge* ($A_{d,t=5}$) apresentados na Tabela 5.

A análise da Tabela 5 deixa evidente que o modelo da RED carece de uma adaptação para praias de sedimentos finos. Os valores de área de duna erodida encontrados por meio dos diferentes valores de *storm surge* (Tabela 5), sozinhos, validariam o modelo da RED, porém, um maior valor dessa variável implica em uma linha d'água mais alta, o que, conseqüentemente, diminui a área existente entre o topo da duna e a linha do *storm surge*. Dessa forma, evidencia-se aqui a necessidade de um ajuste para a variável do *storm surge*, a fim de aplicar o modelo da RED em praias de sedimentos finos.

Segundo Van Rijn (2008a), o nível do *storm surge* é a variável mais expressiva dentro da equação

TABELA 4 – Valores de *storm surge* calculados pelos diferentes métodos citados. Método 01 é referente às adaptações feitas por Benavente *et al.* (2006); Método 02 altera o tempo de atuação das tempestades para 5 horas de duração; Método 03 é proposto por Komar (1998).

Métodos	01 (t = total duração do evento)	02 (t = 5 horas)	03
26 de Março	1.50	1.37	0.33
10 de Junho	-	-	0.40
14 de Setembro	1.54	1.32	0.34
24 de Setembro	1.41	1.33	0.17
28 de Outubro	2.69	2.13	0.36

TABELA 5 – Valores de $A_{d,t=5}$ segundo os valores de *storm surge* encontrados acima para cada método de cálculo do storm surge (métodos 01, 02 e 03). Os valores de área de duna erodida são apresentados em m^3/m^{-1} .

Métodos	01 (t = total duração do evento)	02 (t = 5 horas)	03
26 de Março	79.77	71.50	12.65
10 de Junho	-	-	15.35
14 de Setembro	64.03	38.62	9.37
24 de Setembro	88.00	92.62	5.22
28 de Outubro	210.34	130.77	15.25

TABELA 6 – Valores de área de duna erodida segundo a Regra de Erosão de Dunas (Van Rijn, 2008) e os valores calculados por meio dos perfis de praia

Perfis coletados	$A_{d,t=5} (m^3 \cdot m^{-1})$	Área erodida calculada <i>in situ</i> ($m^3 \cdot m^{-1}$)
P01 (26/03)	79.77	0.82
P02 (10/06)	-	-
P03 (14/09)	64.03	0.47
P04 (24/09)	88.00	0.068
P05 (28/10)	210.34	+1.016

da RED (Eq. 1) e, dessa forma, fica evidenciado que uma melhor estimativa deste parâmetro deve ser abordada para maior credibilidade dos resultados. A disponibilidade de dados de nível do mar obtidos por um marégrafo local poderia auxiliar na análise dos valores obtidos pelos métodos aqui abordados e melhor interpretação do modelo da RED.

A Tabela 6 deixa evidente que o modelo da RED não pôde ser validado com os valores encontrados de área real de duna erodida para a praia do Mar Grosso. Seus valores discrepantes mais uma vez afirmam a necessidade de adaptação do modelo para esse tipo de praia.

Na Tabela 6, observamos que o primeiro evento, como já mencionado anteriormente, resultou em acreção de sedimentos nas dunas estabelecidas, incipientes e no pós-praia. O valor de área erodida calculado pela RED vai contra esse dado *in situ*, apresentando uma área erodida de duna elevada.

Os valores obtidos pela RED estão superestimados e isso pode ser devido à sensibilidade de resposta do modelo frente às variáveis hidrodinâmicas de H_s e T_p . Quanto maiores forem a altura

e o período das ondas, maior será a erosão de duna (Van Rijn, 2008).

Aponta-se ainda, sobre a validação da RED, que o grão do sedimento (d_{50}) da área de estudo (125 μm) é muito pequeno, o que, segundo Van Rijn (2008a), superestima os valores calculados de erosão. Além disso, o diâmetro do grão é uma variável de peso no cálculo da área de duna erodida. Como o modelo fora gerado e testado apenas para sedimentos maiores (acima de 200 μm), uma adaptação da variável d_{50} faz-se necessária para melhor acurácia do modelo para praias de sedimentos finos.

5.1. Escala de Impacto de Tempestade

A Escala de Impacto de Tempestade respondeu de maneira aceitável frente aos valores de *storm surge* estimados pelo método 01. Os dois últimos eventos, que apresentaram maior erosão de duna calculada *in situ*, condizem com regimes de *overwash* propostos por Sallenger (2000).

Regimes erosivos iguais a esses depositam os sedimentos em direção ao continente. Na Figura 4,

TABELA 7 – Classificação dos processos erosivos da área de estudo segundo Sallenger (2000). D_{High} representa a crista da duna, D_{Low} a base da duna, R_{High} o runup máximo e R_{Low} representa o runup mínimo.

Parâmetros	26/03	10/06	14/09	24/09	28/10
D_{High}	3.257	3.257	3.257	3.257	3.257
D_{Low}	1.669	1.723	1.635	1.719	1.549
R_{High}	3.503	3.129	3.318	2.855	5.044
R_{Low}	2.542	2.029	2.520	2.285	3.950
$R_{\text{High}}/D_{\text{High}}$	1.074	0.961	1.018	0.876	1.548
$D_{\text{Low}}/D_{\text{High}}$	0.511	0.528	0.501	0.538	0.476
$R_{\text{Low}}/D_{\text{High}}$	0.781	0.623	0.773	0.701	1.212
Regimes erosivos	Overwash	Collision	Overwash	Collision	Overwash



FIGURA 5 – As duas imagens foram tiradas em frente à área de estudo. No topo, observa-se como o campo de dunas embrionárias estava bastante vegetado no período pós-verão (março 2016). Na imagem inferior (pós-evento extremo do dia 27 de outubro), observa-se como a vegetação foi removida e as dunas frontais escarpadas pela ação das ondas

é possível analisar que no topo das dunas ocorreu leve acreção, mesmo após a passagem de um evento tão intenso, confirmando a caracterização do processo de erosão segundo a escala proposta por Sallenger (2000).

Os resultados encontrados com a aplicação da Escala de Impacto de Tempestade (Tabela 7) apontam boa correlação com a realidade. Em campo, a linha d'água, vegetação e lixo serviram como validação para este modelo. Confirmava-se em campo até onde a linha d'água havia avançado sobre as dunas e depois, analisando o resultado do modelo, era possível comprovar o que fora constatado em campo (Figura 5). Apesar da boa correlação, um único evento não foi validado para este modelo, realçando aqui a importância de dados concretos de *storm surge* para este tipo de estudo. No primeiro evento analisado, o regime erosivo resultante do modelo foi o de *overwash* (Tabela 7), contudo, esse resultado não condiz com as condições encontradas em campo. Para os outros eventos, o modelo respondeu de maneira adequada à situação real da área de estudo.

TABELA 8 – Valores calculados de retração horizontal de dunas após cada evento. R_{dreal} representa o valor real da retração calculado por meio dos perfis de praia, R_d a retração horizontal calculada a partir da RED e R_{dmax} a retração máxima também calculada com base nos valores de área erodida calculados pela RED

Perfis coletados	R_d (m)	R_{dmax} (m)	R_{dreal} (m)
P01 (26/03)	45.40	68.10	+3
P02 (10/06)	-	-	-
P03 (14/09)	37.28	55.93	+1
P04 (24/09)	47.65	71.46	5
P05 (28/10)	371.03	556.54	+1

5.2. Retração horizontal de duna

Na Tabela 8 são apresentados os valores estimados de retração horizontal de dunas (R_d) e retração máxima ($R_{d,max}$); também são apresentados os valores da retração horizontal calculados por meio dos perfis de praia coletados. Esse cálculo de retração horizontal de duna é feito na linha do *storm surge* para cada evento analisado, segundo a metodologia proposta por Van Rijn (2008a).

Nota-se que a retração calculada com base na área erodida dada pela RED está superestimada e não condiz com a real retração horizontal calculada nos perfis. O valor de R_d para o primeiro evento (26 de março), por exemplo, apresenta-se maior do que a real acreção que ocorreu, reforçando, assim, que o valor do *storm surge* e, conseqüentemente, o valor de área erodida de duna calculado pela RED ($A_{d,t=5}$) responderam de forma incoerente com os valores reais medidos *in situ*.

No último evento (28 de outubro), apesar da praia ter sofrido considerável erosão devido à intensidade do evento, as dunas frontais apresentaram retração horizontal apenas na base das mesmas. A acreção de um metro na horizontal (Tabela 8) foi calculada na linha do *storm surge* (2.69 m) seguindo a metodologia de Van Rijn (2008a). Isso comprova que o sedimento erodido pelo evento meteorológico em questão foi depositado no entorno do cordão de dunas frontais, contribuindo para essa acreção e condizendo com as características do regime erosivo tipo *overwash* proposto por Sallenger (2000), o qual deposita o sedimento no entorno da duna em direção ao continente e não ao oceano.

6. Conclusão

A obtenção de dados hidrodinâmicos de qualidade é importante requisito para a utilização da RED e da Escala de Impacto de Tempestade. Os dados obtidos com o ondógrafo da Rede Ondas foram devidamente trabalhados para uma aplicação com qualidade dos mesmos na RED. Porém, a falta de um dado consistente de *storm surge* gerou resultados de área de duna erodida muito mais elevados do que o esperado.

Os diferentes métodos abordados para o cálculo do *storm surge* responderam aos dados hidrodinâmicos de diferentes maneiras, porém, nenhum se mostrou satisfatório, considerando que o cálculo da erosão de dunas *in situ* e pela RED necessitavam de abordagem semelhante para fins comparativos. Assim, baixos valores de *storm surge* (método 03) resultam em um cálculo de área erodida de quase toda a extensão da praia, enquanto que o que o presente trabalho procura a erosão de dunas e não da praia como um todo.

Os valores encontrados pelos métodos 01 e 02 para o *storm surge* condizem com o esperado para estes eventos na área de estudo, porém, quando aplicados na RED, superestimam a área de duna erodida. Isso se deve aos valores dos expoentes de cada variável, principalmente a do *storm surge*. Uma melhor análise da equação deve ser feita para que haja um ajuste nos expoentes e, dessa forma, a equação responderá melhor à área de estudo.

Já os cálculos de erosão de dunas com base nos perfis apresentaram bons resultados, que condizem com as condições que o ambiente praiado era encontrado após cada evento. A diminuição do campo de dunas incipientes, o escarpamento das

dunas estabelecidas e a não presença de vegetação que ocupava a área de estudo são fortes indícios de que a erosão estava ocorrendo durante a realização do trabalho, como se esperava.

A análise dos resultados indica que, baseado nos parâmetros altura de onda, período de ondulação e *storm surge*, a equação da RED pode ser adaptada para responder melhor a valores mais altos desses parâmetros para praias de baixa declividade, como a da área de estudo e adjacências.

O diâmetro do grão do sedimento é um fator crucial na estimativa da erosão das dunas e sua componente dentro da RED deve ser retrabalhada e calibrada para praias de sedimentos finos, já que o modelo foi criado para sedimentos mais grosseiros.

Avançar na análise da RED e dos parâmetros que compõem esse modelo para as praias do Rio Grande do Sul pode tornar sua aplicação viável para a previsão de retração de dunas frente à passagem de eventos altamente energéticos e, principalmente, contribuir para a aplicação de ferramentas mais precisas no cálculo de dimensões de dunas com função principal de proteção costeira.

Tal situação é desejada do ponto de vista do gerenciamento costeiro, principalmente no que tange ao planejamento da ocupação humana em área de intensa movimentação de sedimentos. Além disso, o ajuste da RED para as praias do RS, como mostra a presente pesquisa, auxiliará nas análises de risco e vulnerabilidade para áreas costeiras, tornando-a uma ferramenta útil para a GIZC.

Referências

Almeida, L. E. S. B.; Toldo, E. E. Jr.; Gruber, N. L. S. Avaliação da profundidade de fechamento para o Litoral Norte

do Rio Grande do Sul. *Revista da Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH*, 1999.

Benavente, J.; Del Río, L.; Gracia, F. J.; Martínez-del-Pozo, J. A. Coastal flooding hazard related to storms and coastal evolution in Valdelagrana spit (Cadiz Bay Natural Park, SW Spain). *Continental Shelf Research*, 26, 1061–1076, 2006.

Brasil. Ministério do Meio Ambiente. *Portaria n° 150, de 10 de maio de 2016*. Institui o Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima e dá outras providências. Brasília, *Diário Oficial da União* n° 89, de 11/05/2016.

Calliari, L. J.; Toldo Jr. E. E.; Nicolodi, J. L.; Speranski, N.; Almeida, L. E. S. B.; Lima, S. F.; Esteves, L. S.; Martins, L. R. Rio Grande do Sul. In: Muehe, D. (Orgs.). *Erosão e progradação do litoral brasileiro*. Ministério do Meio Ambiente, p. 438-475, 2006.

De Oliveira, A. O.; Calliari, L. J. Morfodinâmica da praia do Mar Grosso, São José do Norte/RS. *Gravel*, 4, 23-26, 2006.

Dias, J. M. A. Gestão integrada da zona costeira Portuguesa: Forçamentos antrópicos e naturais. *Tourism and Management Studies*, 7-27, 2005.

Figueiredo, S. A.; Calliari, L. J. Sedimentologia e suas implicações na morfodinâmica das praias adjacentes às desembocaduras da linha de costa do Rio Grande do Sul. *Gravel*, 4, 73-87, 2006.

Fontoura, A. S. J.; Almeida, L. E.; Calliari, L. J.; Cavalcanti, A. M.; Moller, O. Jr.; Romeu, M. A. R.; Christófaró, B. R. Coastal Hydrodynamics and Longshore Transport of Sand on Cassino Beach and Mar Grosso Beach, Southern Brazil. *Journal Coastal Research*, 29(4), 855-869, 2013.

Hesp, P. Foredunes and blowouts: initiation, geomorphology and dynamics. *Geomorphology*, 48, 245-268, 2002.

Holman, R. A.; Sallenger, A. H. Jr. High-Energy Nearshore Processes. *Eos*, 67(49), 1369-1371, 1986.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia, Estação Meteorológica de Observação de Superfície Automática. Disponível em: <www.inmet.gov.br/portal/>. Acesso em: ago. 2016.

Judge, E. K.; Overton, F.; Fisher, J. S. Vulnerability Indicators for Coastal Dunes. *Journal of Waterway, Coastal and*

Ocean Engineering, 270-278, 2003.

Klein, R. J. T.; Smith, M. J.; Goosen, H.; Hulsbergen, C. H. Resilience and vulnerability: coastal dynamics or Dutch dikes? *The Geographical Journal*, 164(3), 259-268, 1998.

Klein, A. H. F. *Metodologia para quantificação de perigos costeiros e projeção de linhas de costa futuras como subsídio para estudos de adaptação das zonas costeiras: litoral norte da Ilha de Santa Catarina e entorno*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Extrativismo e Desenvolvimento Rural Sustentável, 2016.

Komar, P. D. *Beach processes and sedimentation*. 2. ed. New Jersey, USA: Editora Pearson Education, 1998.

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

Machado, A. A.; Calliari, J. L. Synoptic Systems Generators of Extreme Wind in Southern Brazil: Atmospheric Conditions and Consequences in Coastal Zone. *Journal of Coastal Research*, SI(75), 1182-1186, 2016.

Nicolodi, J. L.; Cretella, C. *Análisis de la función de protección de dunas costeras frente a escenarios de cambio climático*. Tese (Máster Internacional en Gestión de Zonas Costeras y Estuáricas) - Laboratori d'Enginyeria Marítima, Universidad Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2009.

Rede ondas. Universidade Federal do Rio Grande, RS. Disponível em: <www.redeondas.furg.br>. Acesso em: mar.-nov. 2016.

Sallenger, A. H. Jr. Storm impact scale for barrier islands. *Journal of Coastal Research*, 16(3), 890-895, 2000.

Souza, C. R. de G. A erosão nas praias do Estado de São Paulo: causas, consequências, indicadores de monitoramento e risco. In: Bononi, V. L. R.; Santos Jr, N. A. (Orgs.). *Memórias do Conselho Científico da Secretaria do Meio Ambiente: a síntese de um ano de conhecimento científico acumulado*. Secretaria de meio ambiente do Estado de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 2009.

Van Rijn, L. C. Prediction of dune erosion due to storms. *Coastal Engineering*, 56, 441-457, 2008a.

Van Rijn, L. C. *Erosion of gravel/shingle beaches and barriers*. EU-Project Conscience. Deltares, Delft, The Netherlands, 2008b.

Vellinga, P. Beach and Dune Erosion during Storm Surges. *Coastal Engineering*, 6, 361-387, 1982.

Villwock, J. A.; Tomazelli, L. J. Geologia Costeira do Rio Grande do Sul. *Notas Técnicas*, Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica, UFRGS, Porto Alegre, 8, 1-45, 1995.