

# REGIME DE ONDAS ATUANTES NA PRAIA DO MINHOTO/RN/BR

FERNANDA L. M. RÊGO<sup>1</sup>; LUCAS F. SANTOS<sup>1</sup>; DAVID J. C. ARAÚJO<sup>2</sup>; ADA C. SCUDELARI<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Norte (Graduandos em Engenharia Ambiental, da UFRN, DEC-CT, Campus Universitário, s/n. CEP 59078-970, Natal, RN. nandarego@hotmail.com, saolucas92@hotmail.com).

<sup>2</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Norte (Engenheiro Ambiental, Mestrando em Engenharia Sanitária, Campus Universitário, s/n. CEP 59078-970, Natal, RN david\_bct@hotmail.com).

<sup>3</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Norte (Doutora em Engenharia Civil, Professora Titular da UFRN; DEC-CT, Campus Universitário, s/n. CEP 59078-970, Natal, RN. ada@ct.ufrn.br).

## RESUMO

A praia do Minhoto localizada no litoral setentrional do estado do Rio Grande do Norte, nordeste do Brasil, apresenta considerável importância na economia local e nacional. A região caracteriza-se pela intensa dinâmica costeira, associado à ecossistemas frágeis, sujeitos a inundações em cenário de elevação do nível relativo do mar e processos erosivos intensos. Esse estudo surge com a iniciativa de caracterizar o clima e ondas ao largo da praia de Minhoto utilizando como ferramenta o sistema de modelagem costeira do Brasil - SMC-Brasil. Ao SMC-Brasil se encontra integrado um banco de dados de reanálise de ondas, proveniente de uma série histórica de 60 anos (1948-2008), o qual incorpora possíveis variações meteoceanográficas. A construção dessa base de dados consistiu da aplicação de uma técnica de *downscaling*, na qual se utilizou o modelo numérico SWAN. As informações de parâmetros de onda podem ser acessadas por meio da seleção de pontos (denominados DOW – Downscaling Ocean Waves) distribuídos ao longo do litoral brasileiro. A caracterização do clima de ondas da praia em estudo se deu pela escolha de um ponto DOW representativo a partir do apanhamento de onze pontos iniciais e a seleção do ponto teve como critérios a análise de estatística descritiva. A partir dos resultados, constatou-se que na região predominam ondas com alturas médias de aproximadamente 1,1 m e período de 10 s provenientes dos quadrantes nordeste e sudeste. Para períodos de retorno maiores que 10 anos, provavelmente ligados a eventos extremos de agitação marítima, verifica-se Hs superior a 3 m com período de pico associado de 18 s. Essa caracterização da região é o primeiro passo para a realização de projetos que simulem efeitos hidrodinâmicos em regiões de menor profundidade, com influência direta sobre as praias, que podem levar em consideração variações do nível do mar, como a ocorrência de estados do mar em vista de eventos extremos.

**Palavras-Chave:** SMC-Brasil; clima de ondas; variações meteoceanográficas.

**Tema:** Água e serviços dos ecossistemas.

## INTRODUÇÃO

A praia do Minhoto localizada no litoral setentrional do estado do Rio Grande do Norte, nordeste do Brasil, a cerca de 170 km de distância da capital Natal, é uma região que apresenta considerável importância na economia local e nacional, tendo como atividades a indústria petrolífera, indústria salinera, parques eólicos, carcinicultura, pesca artesanal e o turismo. A região caracteriza-se pela intensa dinâmica costeira, associado a ecossistemas frágeis, sujeitos a inundações em cenário de elevação do nível relativo do mar e processos erosivos intensos, apresentando risco às principais atividades econômicas anteriormente citadas.

Surge daí a necessidade de estudar a variabilidade costeira do local, avaliando o regime de ondas atuantes, uma vez que os sistemas praias constituem uma zona de alta energia com dinâmica extremamente ativa e complexa, estando sujeitas a alterações morfológicas em curtos intervalos de tempo decorrente de variações nas condições energéticas atuantes (KOMAR, 1976). A modelagem numérica tornou-se uma ferramenta fundamental para estudos de variabilidade costeira, já que estes modelos fundamentam-se em equações que regem os princípios físicos atuantes no ambiente, possibilitando prevenir e simular o comportamento de um sistema sobre determinadas condições (DOBROCHINSKI, 2009).

O sistema de modelagem SMC foi desenvolvido inicialmente pelo instituto hidráulico Ambiental da Universidade da Cantábria (IH-Cantábria), com o apoio da Diretoria Geral Costeira do Ministério do Meio Ambiente da Espanha, e possui como forma adaptada ao litoral brasileiro o SMC-Brasil, que integra um conjunto de ferramentas, incluindo metodologias, base de dados de dinâmica marinha e modelos numéricos, similares à versão espanhola do sistema (GONZÁLEZ *et al.*, 2007), assim como metodologias que permitem estudar os processos costeiros e quantificar as variações que sofre o litoral como consequência de eventos naturais e/ou de atuações antrópicas na costa.

Esse estudo surge, então, como uma iniciativa de caracterizar o clima de ondas ao largo da praia de Minhoto como forma de monitoramento ambiental da dinâmica natural deste ambiente, utilizando como ferramenta o sistema de modelagem costeira do Brasil - SMC-Brasil (IH-CANTÁBRIA, 2013). Ao SMC-Brasil se encontra integrado um banco de dados de reanálise de ondas provenientes de uma série histórica de 60 anos (1948-2009) (REGUERO *et al.*, 2012), o qual incorpora possíveis variações meteoceanográficas. Além disso, informações a respeito de parâmetro de onda são escassas para a região e poderiam ser utilizadas como dados de entrada para simulações de propagações de campos de ondas e correntes ao longo da costa.

## METODOLOGIA

### Modelo SWAN como metodologia para escolha do ponto DOW

O SMC integra uma série de modelos numéricos, estruturados e especificamente organizados de acordo com as escalas espaciais e temporais dos processos a serem modelados. O programa ainda dispõe de metodologias que permitem estudar os processos costeiros e quantificar as variações morfológicas do litoral como consequência de eventos naturais e/ou de atuações antrópicas na costa (MARCELINO *et al.*, 2014).

O banco de dados presente no SMC consiste na aplicação de uma técnica de *downscaling*. Essa técnica consiste na reconstrução de uma série global de ondas, a qual utiliza o modelo numérico SWAM (BOOIJ *et al.*, 1999). Como resposta desse procedimento foram gerados uma série de pontos distribuídos ao longo do litoral brasileiro com

informações de parâmetros de ondas características de profundidades intermediárias, como altura de onda significativa ( $H_s$ ), período de pico ( $T_p$ ) e direção média das ondas ( $\theta_m$ ).

O SWAN é um modelo numérico que se baseia numa formulação euleriana do equilíbrio de densidade espectral discreta de ação, que corresponde à propagação de refração sobre batimetria arbitrária e campos correntes (BOOIJ *et al.*, 1999). O esquema numérico de propagação é implícita, o que implica que os cálculos são mais econômicos em águas de menor profundidade. Os resultados do modelo concordam bem com soluções analíticas, observações de laboratório e de campo (generalizada).

O modelo SWAN é capaz de propagar ondas de qualquer direção, uma vez que é impulsionado por condições de contorno e ventos locais, e incorporar fenômenos exclusivos de profundidades rasas como a quebra das ondas e interações não lineares. Esse programa, porém, não é capaz de resolver os efeitos de difração sofridos pelas ondas, que ocorre em regiões de menor profundidade. Devido à escassez de dados de campo para validação do modelo, optou-se por selecionar pontos para análise situados à cota batimétrica mínima de 15 m.

### **Seleção do ponto DOW**

A caracterização do clima de ondas da praia em estudo se deu pela análise de gráficos e tabelas de parâmetros estatísticos de ondas, escolhendo um ponto DOW representativo a partir da seleção de onze pontos iniciais, representados na Figura 1, assim como a praia e estudo. Estes pontos, por sua vez, foram selecionados tendo como critério apenas a profundidade devido às limitações do programa abordadas no item anterior.

A seleção do ponto teve como critérios a análise de estatística descritiva por meio de histogramas e gráficos de regressão linear, avaliando principalmente a probabilidade de direção, sua distância em relação à linha de costa, sua cota batimétrica (profundidade superior a 15 m devido às limitações do modelo SWAN) e as similaridades entre os seus parâmetros estatísticos com os dos outros pontos analisados.

A análise aprofundada do ponto DOW selecionado resultou em uma série de gráficos e tabelas gerados a partir de métodos estatísticos descritivos, a saber: de parâmetros de onda, apresentado uma abordagem estatística descritiva dos parâmetros, em que, para se analisar o clima de ondas analisou-se a altura significativa de onda ( $H_s$ ), período de pico ( $T_p$ ) e direção média de onda ( $\theta_m$ ) em condições médias (índice “50%”) e em estados de mar superados apenas 12 horas ao ano (índice “12”), refletindo condições extremas de agitação marítima.

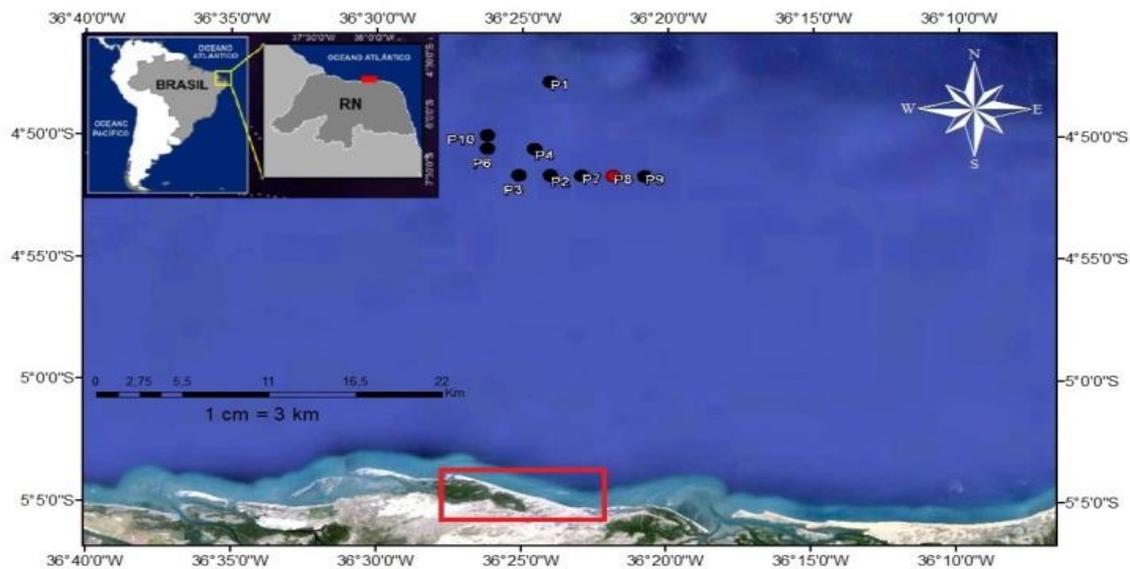


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo e pontos DOW selecionados para caracterização do clima de ondas, sendo em vermelho o ponto escolhido como representativo e o retângulo a praia de estudo.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### Escolha do ponto DOW representativo

A probabilidade de incidência (Figura 2) foi um dos parâmetros analisados buscando caracterizar as principais direções em que as ondas chegam à costa, como resultado tem-se que para a região de estudo as ondas incidem, predominantemente, das direções Norte (N), Norte-Nordeste (NNE), Nordeste (NE), Leste-Nordeste (ENE), Leste (E), Leste-Sudeste (ESE), Sudeste (SE) e Sul-Sudeste (SSE).

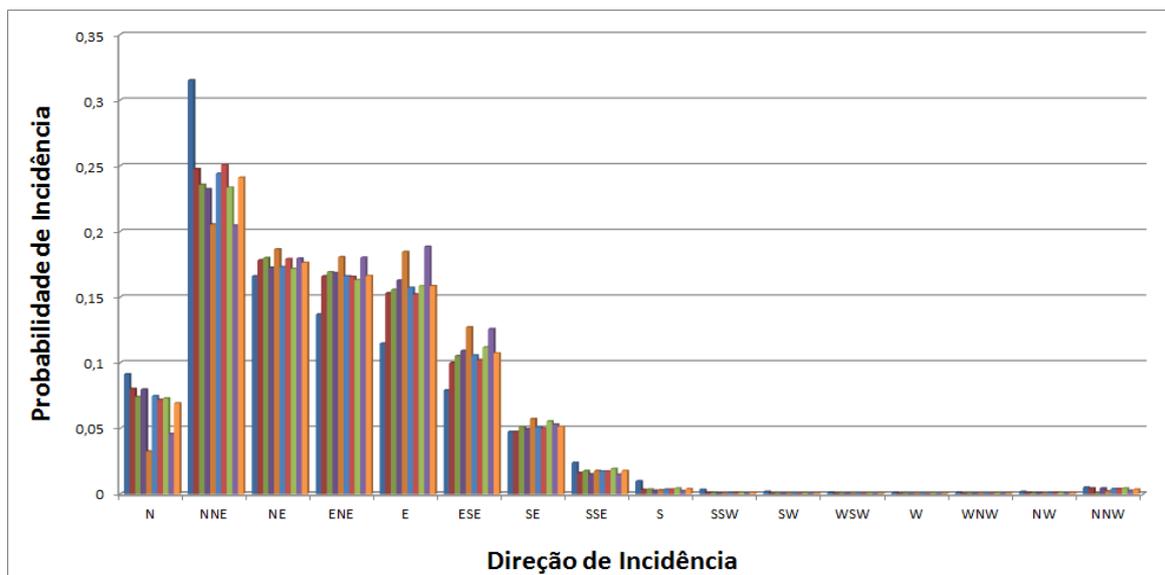


Figura 2 – Gráfico da probabilidade de direção dos pontos DOW selecionados.

A análise dos histogramas de altura de onda por direção de incidência nas condições propostas (Figuras 3a e 3b) destacaram o Ponto 8 como o ponto que apresenta os valores

que mais acompanham a média aritmética geral. Vale salientar que o Ponto 5 não entrou na análise, já que representa um ponto após a plataforma continental e foi escolhido apenas para analisar as transformações que as ondas sofriam de regiões profundas para regiões intermediárias.

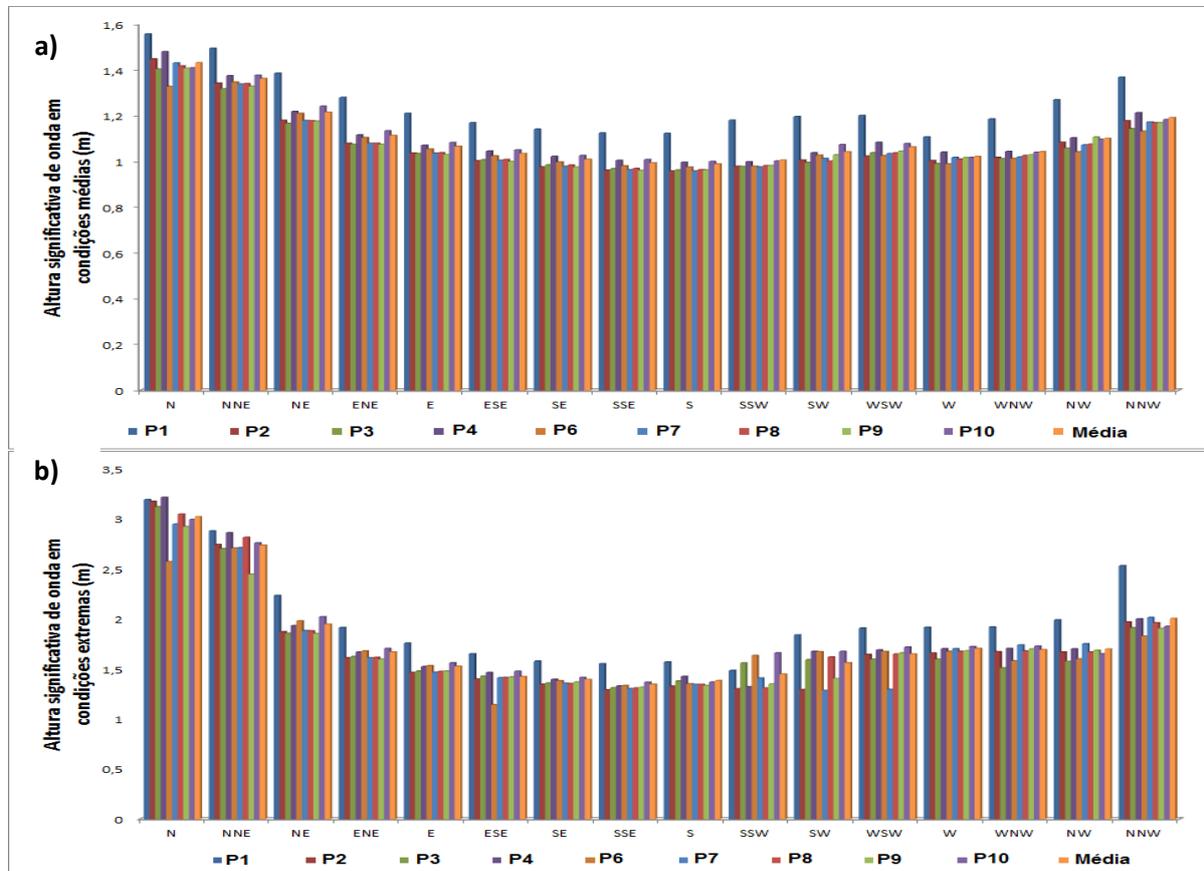


Figura 3. Gráficos de altura significativa de onda por direção de incidência em condições médias (a) e extremas (b).

O gráfico de regressão linear (Figura 4) mostra a atuação das ondas em cada direção relacionando as alturas de onda significativa (em condições normais e extremas) no ponto 8 com a altura significativa (em condições normais e extremas) em todos os pontos analisados. Dentre todos os pontos analisados o ponto escolhido apresenta alguns dos valores mais elevados desses parâmetros, além de exibir valores semelhantes à média aritmética geral, como constatado pelos altos coeficientes de correlação por regressão linear ( $R^2$ ).

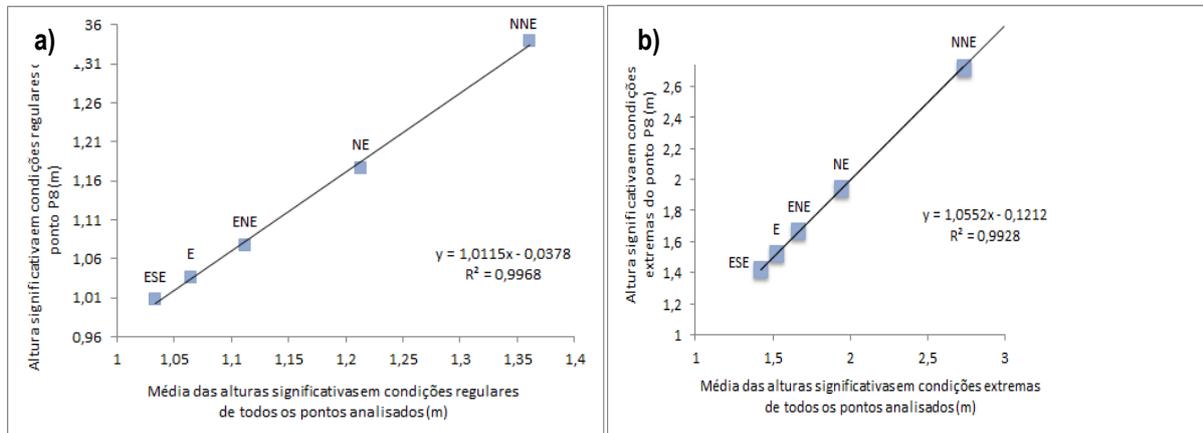


Figura 4. Regressão linear entre as alturas significativas do ponto P8 e a média aritmética geral dos pontos analisados em (a) condições regulares ( $H_{s50\%}$ ) e (b) condições extremas ( $H_{s12}$ ).

A partir da análise do ponto selecionado, observa-se que na região de estudo as ondas de maior frequência incidem das direções NNE, NE, ENE, E e ESE, as quais representam cerca de 85% de incidência na área estudada (Tabela 1). Desse percentual, em condições medias, a altura significativa de onda ( $H_{s50\%}$ ) foi de 1,33m para NNE, 1,17m para NE, 1,07m para ENE, 1,03m para E e 1,00m para ESE. Nessas condições, os valores de período de pico ( $T_{p50\%}$ ), nas direções mencionadas anteriormente apresentam, respectivamente, 11,25s, 10,25s, 8,60s, 7,12s e 5,77s.

Em casos de eventos extremos, há um maior fornecimento de energia ao clima de ondas, como por exemplo, as tempestades, com ventos e ondas fortes, dessa forma o parâmetro  $H_{s12}$  é avaliado como altura significativa em função de seu valor, se superado 12h ao ano. Assim como valores de  $H_{s12}$  para esse tipo de evento, para as direções NNE, NE, ENE, E e ESE, foram 2,80m, 1,87m, 1,61m, 1,47m e 1,41m, com os respectivos períodos de pico ( $T_{p12}$ ) de 17,15s, 14,8s, 12,8s, 11,17s e 9,78s.

Direções	Probabilidade de direções	Hs <sub>50%</sub> (m)	Tp <sub>50%</sub> (s)	Hs <sub>12</sub> (m)	Tp <sub>12</sub> (s)
N	0,07	1,41	12,57	3,04	18,10
NNE	0,25	1,34	11,25	2,81	17,15
NE	0,18	1,18	10,26	1,87	14,81
ENE	0,16	1,08	8,61	1,61	12,81
E	0,15	1,04	7,12	1,47	11,17
ESE	0,10	1,01	5,78	1,41	9,78
SE	0,05	0,98	4,48	1,35	8,87
SSE	0,02	0,97	3,47	1,31	8,77
S	0,004	0,96	3,7	1,34	8,69

Tabela 1. Probabilidade de direções, probabilidade de altura significativa de onda (Hs) e período de pico (Tp) em condições regulares (50%) e de regime extremo (12), nas principais direções de incidência, analisando o Ponto 8.

### Estatística descritiva do ponto DOW representativo

A partir das funções de distribuição (figura 5), obtidas pelo modulo de análise estatística do SMC, observa-se que 75% dos estados do mar apresentam ondas com alturas inferiores a 1,313 m e períodos de pico inferiores a 11,05 s.

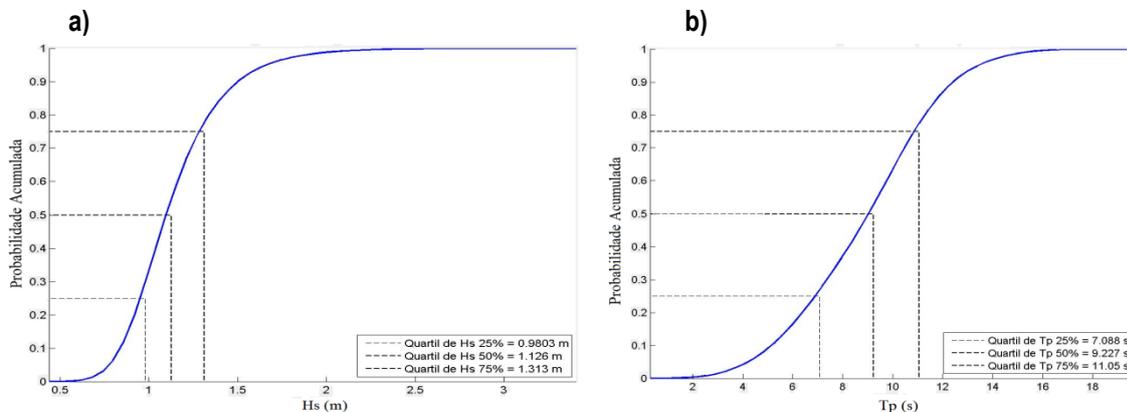


Figura 5. Função de distribuição entre Probabilidade Acumulada e Altura de onda significativa (Hs) e Períodos de pico (Tp).

No histograma apresentado na figura 6b verifica-se Hs variando de 0,4m a 3,4m, com maior frequência de ocorrência aproximadamente de 1,1m. Para períodos de retorno maiores que 10 anos (Figura 6a), provavelmente ligados a eventos extremos de agitação marítima, verifica-se Hs superior a 3 m com período de pico associado de 18 s (Figura 7a). No histograma da (Figura 7b) a amplitude vai de 0 a 19 s, com maior predominância em 10 s. Nos diagramas de distribuição conjunta Hs-Dir e Tp-Dir (Figura 6c e 7c) observa-se uma maior frequência de ocorrência das ondas vindas do range de direções entre 135° (Sudeste) e 15° (Norte-Nordeste), com altura de onda significativa variando entre 0,7 m e 2,0 m e período de pico variando aproximadamente entre 4 s e 16 s.

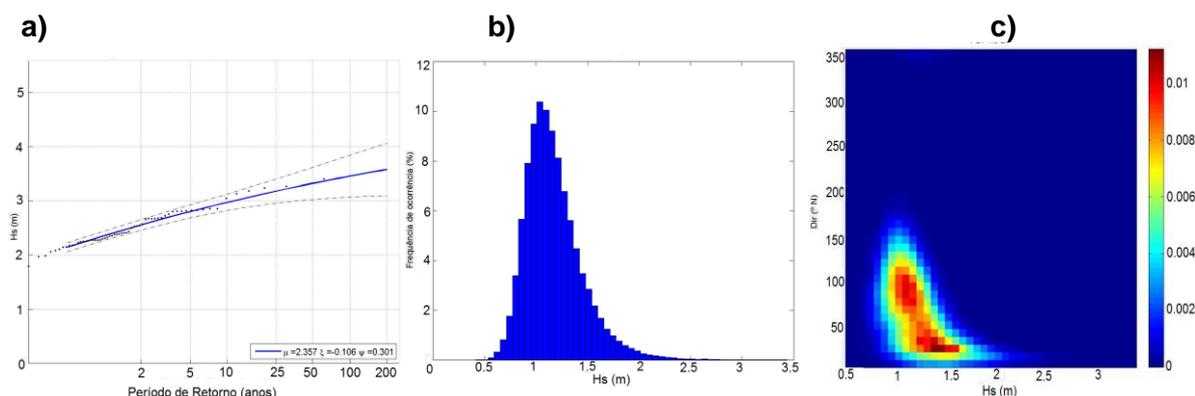


Figura 6. Valores extremos por Máximos Anuais (a), Histograma de Hs (b) e Distribuição conjunta Hs-Dir (c).

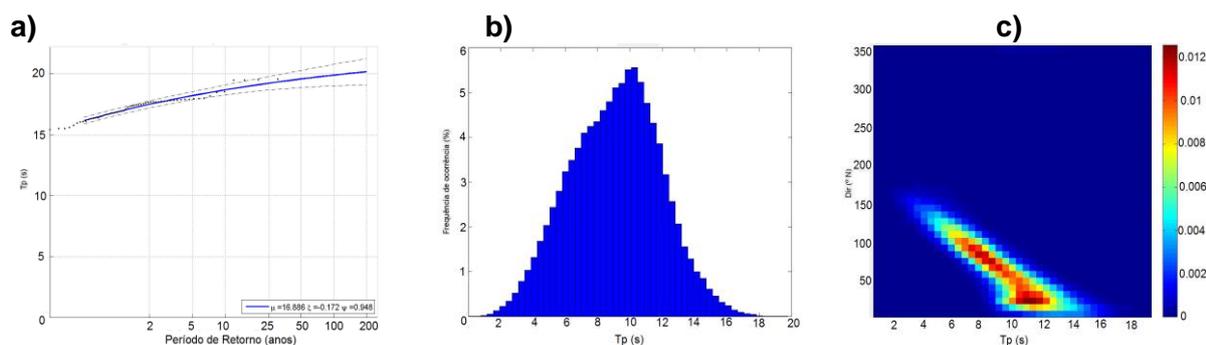


Figura 7. Valores extremos por Máximos Anuais (a), Histograma de Tp (b) e Distribuição conjunta T (c).

Pelos dados resultantes da estatística descritiva, é observada na área de estudo uma predominância de ondas do tipo *swell*. Ondas desse tipo são, em sua maioria, caracterizadas por apresentarem longos períodos (maiores que 8 s) e maiores alturas de onda (REEVE *et al.*, 2004). Pode-se comprovar essa característica, também, pela incidência de ventos pertencentes aos quadrantes Norte-Leste e Leste-Sudeste, justificando a intensa dinâmica costeira.

## CONCLUSÕES

A escolha do ponto Dow representativo foi possível pelo uso do método de *downscaling*, que integra a base do software SMC-Brasil, possibilitando a caracterização da dinâmica de ondas recorrente na praia. O ponto escolhido então foi o P8, de coordenadas – latitude: -4.861° e longitude: -36.360°–.

A análise da estatística descritiva mostrou que na região predominam ondas com alturas médias de aproximadamente 1,1 m e período de 10s e em situações extremas 1,31m e 11,05s provenientes dos quadrantes nordeste e sudeste. Têm-se então predominância de ondas do tipo *swell* que apresentam menor frequência de ocorrência ao se deslocarem por

ampla faixa de fetch (distância horizontal sobre a qual os ventos percorrem), e acabam por atingir a costa com alto comprimento e período, provocando uma elevação do volume de água (*set-up*), e como consequências acabam por movimentar o sedimento de fundo e promover a transposição dos sedimentos da face de praia em direção ao mar.

A caracterização do clima de ondas da região é o primeiro passo para a realização de projetos que simulem efeitos hidrodinâmicos em regiões de menor profundidade, com influência direta sobre as praias. Essas simulações podem levar em consideração variações do nível do mar, como por exemplo, o aumento do range das marés e a ocorrência de estados do mar em vista de eventos extremos.

## REFERÊNCIAS

BOOIJ, N.; R.C. RIS AND L.H. HOLTHUIJSEN. "A *Third-generation Wave Model for Coastal Regions, Part I, Model Description and Validation*". *J. Geophysical Research*, Vol. 104, No. 4, pp. 7649-7666, 1999.

DOBROCHINSKI, J.P.H. *Redução e esquematização do clima de ondas para modelagem morfológica*. 2009. 108f. Monografia (Bacharel em Oceanografia). Universidade do Vale do Itajaí, Itajaí, 2009.

GONZÁLEZ, M. et al. An integrated coastal modeling system for analysing beach processes and beach restoration projects, SMC. *Computers and Geosciences*, v. 33, n. 7, p. 916-931, 2007. ISSN DOI: 10.1016/j.cageo.200612.005.

IH-CANTÁBRIA. *Sistema de Modelado Costeiro - Manual de Referência*. Instituto de Hidráulica Ambiental da Universidade de Cantábria. Santander, p. 160. 2013.

KOMAR, P.D. *Beach process and sedimentation*. New Jersey: Prentice-Hall, 1976.

MARCELINO, A.M.T.; GOMES, L.R. de S.; ARAÚJO, D.J.C. de. (IDEMA). *SMC-Brasil: Estudo de caso praia de Soledade, Macau/RN, litoral equatorial do Brasil*. Relatório Final, p. 65. 2014.

REEVE, D.; CHADWICK, A.; FLEMING, C. (2004) *Coastal Engineering: processes, theory and design practice*. New York: Spon Press, 490 p.

REGUERO, B.G.; MENÉNDEZ, M.; MÉNDEZ, F.J.; MÍNGUEZ, R.; LOSADA, I.J. *A Global Ocean Wave (GOW) calibrated reanalysis from 1948 onwards*. *Costal engineering*, n. 65, p. 38-55, 2012.

SANTOS, A. L. S.; AMARO, V. E.; SANTOS, M. S. T. *Geodésia de precisão aplicada à análise da evolução morfodinâmica de curto prazo na ilha barreira do Corta Cachorro, Litoral do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil*. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 15, n. 3, p. 425-442, junho 2014. ISSN ISSN 2236-5664.

WRIGHT, L.D.; SHORT, A.D. *Morphodynamic variability of surf zones e beaches: a synthesis*. *Marine Geology*, Amsterdam, v. 56, p. 93-118, 1984.