

# Variabilidade Interanual do Potencial Energético das Ondas Oceânicas na Costa Setentrional do Rio Grande do Norte, Atlântico Equatorial Sul

*Interannual Variability of Ocean Wave Energy Potential in the Northern Coastal of Rio Grande do Norte, South Equatorial Atlantic*

Maria de Fátima Alves de Matos<sup>1</sup> , Ada Cristina Scudelari<sup>2</sup> ,  
Venerando Eustáquio Amaro<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Instituto SENAI de Inovação em Energias Renováveis, Natal, RN, Brasil

<sup>2</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil

E-mails: mfatimaalves.m@gmail.com; adaufrn@gmail.com; venerando.amaro@gmail.com

**Autor Correspondente:** Maria de Fátima Alves de Matos; mfatimaalves.m@gmail.com

## Resumo

Este estudo tem como objetivo descrever o potencial de energia das ondas oceânicas na costa do Estado do Rio Grande do Norte, Extremo Nordeste do Brasil, com base em resultados de simulações numéricas de ondas entre os anos de 2010 a 2017. Para caracterizar o regime das ondas e avaliar o potencial de energia das ondas foram usados os modelos espectrais: *WaveWatch III*, este para a geração de ondas em águas *offshore* com saídas para as condições de contorno para o modelo de propagação das ondas; e, o modelo SWAN para as transformações e propagação das ondas geradas ao largo até a zona costeira. Testes de validação foram realizados com dados de medições *in situ* para ser avaliado o fluxo de energia de ondas em pontos próximos da costa. A avaliação da série temporal dos dados da simulação é apresentada quanto sua variação temporal, incluindo a variabilidade sazonal, e quanto sua distribuição espacial ao longo do domínio geográfico da modelagem. Os resultados estatísticos mostram que ao longo dos anos o potencial de energia das ondas possui variabilidade significativa entre os meses. De dezembro a março a energia das ondas são mais intensas, com valores máximos atingindo 16,7 kW/m e 25,9 kW/m, influenciadas pelas maiores alturas significativas de ondas e direções predominantes de N para NE. De junho a setembro, o comportamento do potencial de energia das ondas é reduzido a baixos níveis, 0,03 e 0,9 kW/m, com ondas provenientes de N a ENE. Em termos de distribuição espacial, o talude continental foi considerado a zona mais energética, com média de 25 kW/m durante o verão. Contudo, os resultados mostraram também que em alguns setores da plataforma continental interna, próximo da profundidade de 25 m, houve a ocorrência de valores de potencial de energia de ondas com máximos de 44 kW/m durante o verão.

**Palavras-chave:** Energia das ondas; Variabilidade sazonal; Nordeste do Brasil

## Abstract

This study aims to describe the energy potential of the ocean waves on the coast of the State of Rio Grande do Norte, Extreme Northeast Brazil, based on results of numerical wave simulations between the years 2010 to 2017. To characterize the wave regime and to evaluate the energy potential of the waves were used the spectral models: *WaveWatch III* for the generation of waves in deeper water with outlets for the boundary conditions for the wave propagation model; and, the SWAN model for the transformations and propagation of waves generated on deep water to the shallow water of coastal zone. Validation tests were performed with *in situ* measurements data to evaluate the energy flux of waves at points on the coastal area. The evaluation of the time series of simulated data is presented in terms of its temporal variation, including seasonal variability, and its spatial distribution along the geographic domain of the modeling. The statistical results show that over the years the wave energy potential has significant variability with the seasons. From December to March wave energy is more intense, with maximum values reaching 16.7 kW/m and 25.9 kW/m, influenced by the largest significant wave heights and predominant directions from N to NE. From June to September, the behavior of the wave energy potential is reduced to low levels, 0.03 and 0.9 kW/m, with waves from N to ENE. In terms of spatial distribution, the continental slope was considered the most energetic zone, with an average of 25 kW/m during the summer. However, the results also showed that in some sectors of the inner continental shelf, close to the 25 m depth, there were occurrences of wave energy potential with maximum of 44 kW/m during the summer.

**Keywords:** Wave energy; Seasonal variability; Northeast of Brazil

Recebido em: 21 Setembro 2021; Aprovado em: 27 Setembro 2021

Anu. Inst. Geociênc., 2022;45:46460

DOI: [https://doi.org/10.11137/1982-3908\\_45\\_46460](https://doi.org/10.11137/1982-3908_45_46460) 1

## 1 Introdução

Em zonas costeiras, a atividade marítima assume um papel de grande relevância e, portanto, saber avaliar e prever adequadamente as condições do estado de mar é extremamente relevante. Para tal, é necessário ter em conta que, à medida que se aproximam da costa, as características das ondas começam a modificar-se devido à influência do fundo (Rosman et al. 2007). De forma a caracterizar corretamente os efeitos das baixas profundidades (Matos et al. 2014), é necessário um modelo que tenha em conta os processos físicos complexos de transformação do estado do mar que se verificam ao longo e perto da costa (Akpınar et al. 2012).

Estas avaliações e previsões são especialmente importantes nas áreas costeiras de grande atividade de navios (Soares et al. 2014) e/ou presença de plataformas de exploração petrolífera, ou quaisquer outros tipos de atividades exploratórias. Estas avaliações também são necessárias quando se pretende obter novas formas de aproveitamento dos recursos do mar, como por exemplo, a instalação de conversores de energia das ondas (Falcão 2010).

Em um contexto atual em que é cada vez mais necessário operacionalizar novas formas de obtenção de energia, de preferência renovável e sob os preceitos da sustentabilidade, intenciona-se a energia das ondas como um caminho a seguir. Durante os últimos anos têm surgido investigações sobre as possibilidades para extração energética dos oceanos e que inclui, principalmente, a conversão da energia das ondas, sendo esta já considerada atualmente uma tecnologia comercial (Falcão 2010) especialmente em algumas áreas reconhecidas como de altas energéticas no Oceano Atlântico (Galabov 2013).

Estudos sobre o potencial de energia de ondas vêm sendo realizados, especialmente em algumas áreas do mundo, a exemplo: Portugal (Falcão & Henriques 2019; Pontes, Aguiar & Pires 2005; Rusu & Soares 2012; Soares et al. 2014), Espanha (Iglesias et al. 2009; Iglesias & Garbalho 2010), Suécia (Bernhoff, Sjostedt & Leijon 2006; Waters et al. 2009), Itália (Liberti, Carillo & Sannino 2013), Romênia (Onea & Rusu 2019; Rusu & Rusu 2019), Estados Unidos (Beyene & Wilson 2007; Defne, Haas & Fritz 2009; Lenee-Bluhm, Paasch & Özkan-Haller 2011; Stopa, Cheung & Chen 2011), Argentina (Lanfredi et al. 1992), Coréia do Sul (Kim et al. 2011), Taiwan (Chen et al. 2010), Turquia (Akpınar & Kömürçü 2012), Cazaquistão (Sumer, Zhanaltay & Parkhomchik 2019), Austrália (Hughes & Heap 2010) e Mar Cáspio (Jahangir & Mazinani 2020; Kamranzad, Etmad-Shahidi & Chegini 2016). Estes estudos geralmente combinam a modelagem numérica embasados em extenso e longo período de medições *in situ* dos parâmetros de ondas,

que são necessários para produzir estimativas confiáveis dos modelos numéricos (Galabov 2013).

No Brasil, alguns estudos para estimar o potencial de energia de ondas merecem destaque, como por exemplo, Carvalho (2010), Silva (2013) que caracterizaram o clima e a energia de ondas em nível de toda costa brasileira, identificando as regiões mais energéticas espacialmente. Lisboa, Teixeira & Fortes (2017), caracterizaram o potencial de energia das ondas na região sul do Brasil com potência próxima da costa variando de 6,72 e 22,3 kW/m. Espindola & Araújo (2017) em estudo realizado para a toda costa brasileira, conseguiram calcular em 89,97 GW o total de recurso de energia das ondas disponíveis, considerando um valor médio para toda a costa de 12,01 kW/m, considerando que o potencial global estimado é de 1 a 10 TW (Wang 2019). Sendo assim deste total, 20% seriam convertidos em energia elétrica, o que aproximadamente equivale a 17% da capacidade total instalada no País. E mais recentemente, Pegorelli et al. (2018), estudaram parte da costa brasileira (Pernambuco até Rio Grande do Sul), identificaram que o potencial energético de ondas na costa sul do Brasil varia de 10 e 30 kW/m, sobretudo, durante a passagem de frentes frias na região sul e sudeste.

Contudo, o procedimento para uso pleno desta fonte de energia é lento e demorado, considerando que vários obstáculos ainda devem ser ultrapassados (Alamian et al. 2014), devido a tecnologia ainda ser considerada em fase de desenvolvimento em várias partes do mundo, os custos relacionados a instalação e manutenção ainda serem elevados (One Earth Future 2016). Outra questão proeminente diz respeito aos conversores *offshore* que, em ambientes de águas profundas, necessitam suportar condições de ondas extremas, levando a grandes desafios de Engenharia Estrutural (Czech & Bauer 2012).

Enquanto isso, uma das principais tarefas sobre a utilização da energia das ondas, para o pleno sucesso de sua inserção na matriz energética nacional, está no passo preliminar que é reconhecer o regime de ondas disponível e estimar o potencial de energia de onda oceânicas (López et al. 2013). Como a maioria das formas de recursos renováveis, a energia da onda é de duração praticamente inesgotável, mas limitado e altamente variável por unidade de tempo, além da distribuição desigual ao longo do globo (Alamian et al. 2014; Gunn & Stock-Williams 2012; López et al. 2013; Mørk et al. 2010; Soares et al. 2014). Conforme sugeriu Soares et al. (2014), os melhores climas de ondas oceânicas estão localizados em zonas temperadas, entre as latitudes de 30° a 60°, com nível de potência média anual entre 20 e 70 kW/m de frente de onda. Contudo, em algumas zonas equatoriais, como é o caso da costa Nordeste do Brasil, entre as latitudes de 0° a 30° são encontrados climas

de ondas atraentes, onde os ventos alísios são regulares ao longo do ano.

Assim, o objetivo deste estudo foi caracterizar o regime de ondas e estimar o potencial de energia das ondas oceânicas da plataforma continental setentrional do Estado do Rio Grande do Norte (RN), na zona equatorial do Nordeste do Brasil, a partir da base de dados de simulações numéricas com o modelo *Simulating Waves Nearshore* - SWAN (Booij, Ris & Holthuijsen 1999) para um período de 2010 e 2017. Para tanto, foi efetuado primeiramente uma análise comparativa com medidas *in situ* de curta duração, com o objetivo de validar o modelo. Além disso, o estudo realizou análises estatísticas e avaliação da variabilidade interanual, sazonal, mensal e espacial do potencial de energia das ondas.

## 1.1 Caracterização da Área de Estudo

A plataforma continental setentrional do Estado do Rio Grande do Norte (RN), entre a península de Galinhos e o cânion submerso do rio Mossoró/Apodi (4°55'17,73"S/37°06'16,73" e 4°30'29,22"S/36°17'18,94"W), é a área de interesse deste trabalho, pois abriga setores de grande importância socioeconômica para o RN e para o país. Nesta zona costeira se destacam as indústrias de produção de sal marinho, exploração e produção de hidrocarbonetos e gás natural, e parques de produção de energia eólica, onde estão potencializados os conflitos desses usos instalados na orla marítima com os aspectos relevantes como a alta sensibilidade ambiental das unidades geoambientais costeiras e estuarinas e a exposição às intensas forças motrizes da hidrodinâmica costeira (Figura 1).

A plataforma continental setentrional é caracterizada por um sistema sedimentar misto (siliciclásticos, carbonato-siliciclásticos e carbonáticos), distribuídos nas porções interna, média e externa (Pessoa Neto 2003; Vital et al. 2008). Esta plataforma continental possui largura média de 40 km, onde o alinhamento do talude continental ocorre relativamente paralelo à linha de costa atual e apresenta uma quebra acentuada a partir de profundidades de 50 m (Vital et al. 2008). Entre as feições morfológicas do relevo submerso, estão presentes: os campos de dunas longitudinais e transversais a costa, bancos de recifes de corais, alinhamentos de arenitos de praia (*beachrocks*), relevo de cânion submerso relacionados aos principais estuários presentes nesse litoral (Testa & Bosence 1998; Vital et al. 2008) e cordões arenosos (Nascimento Neto et al. 2019).

O litoral setentrional do RN está sob a influência dos Anticiclones Subtropicais do Atlântico Sul (ASAS) e do Atlântico Norte (ASAN) e do cavado equatorial,

cujas variações sazonais de intensidade e posicionamento determinam o clima na região (Cavalcanti et al. 2009). Os ventos de baixos níveis associados aos sistemas de pressão são os Alísios de sudeste, na borda norte do ASAS, e de nordeste, na borda sul do ASAN, os quais apresentam velocidades médias de 6,7 cm/s, com amplitude entre 2,6 - 13,4 cm/s (Cavalcanti et al. 2009).

No eixo do cavado equatorial está a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), cujas variações em posição e intensidade estão diretamente relacionadas às alterações nas posições e intensidades do ASAS e do ASAN, de modo que a ZCIT no Atlântico está na região de convergência dos alísios de nordeste e sudeste, apresentando movimentos ascendentes, baixas pressões, nebulosidade e chuvas abundantes, e segue as regiões onde a Temperatura da Superfície do Mar (TSM) é mais elevada (Cavalcanti et al. 2009).

Devido ao posicionamento geográfico, este litoral encontra-se sob a influência do giro oceânico equatorial (Mayer & Weisberg 1993), cujas principais correntes marinhas de destaque são a: Subcorrente Norte do Brasil (SNB) e a Corrente Norte do Brasil (CNB). A SNB é uma corrente com velocidades de 1 m/s em profundidades de 150 a 250 m (Silveira, Miranda & Brown 1994). Ao Norte de 5°S, a Corrente Sul Equatorial (CSE) interfere na SNB e a faz perder a característica de subcorrente e se transformar na CNB (Schott, Fischer & Stramma 1998). A CNB é a principal corrente de contorno oeste localizada em baixas latitudes e a principal responsável pela troca de propriedades físico-químicas e biológicas entre os Hemisférios Norte e Sul na área do Oceano Atlântico (Marin 2009).

## 2 Metodologia e Dados

As características das ondas: Hsign - altura significativa (m), TM02 - período médio absoluto do zero ascendente da onda (s), PDIR - período de pico (°), DEP - profundidade (m), RTP - período de pico relativo (s), DIR - direção média da onda (°), TM01 - período médio da onda absoluta (s), foram obtidas a partir da *hindcasting* numérica, para um período de sete anos (entre os anos de 2010-2017) usando o modelo numérico SWAN (Booij, Ris & Holthuijsen 1999). Este modelo foi calibrado para o litoral setentrional do RN por Matos et al. (2013). O modelo SWAN foi operacionalizado pela ferramenta de interface SOPRO (Fortes, Pinheiro & Palha 2007; Fortes, Pinheiro & Santos 2011; Pinheiro et al. 2005; Santos et al. 2005). Especificamente para a realização deste trabalho, optou-se pela utilização de dois conjuntos de dados *in situ* situados próximos da costa para a validação da estimativa do potencial de energia de ondas.

### 2.1 Dados de Ondas In Situ

A base de dados *in situ* empregada na validação e comparação dos parâmetros de altura significativa ( $H_s$ ) e energia de onda ( $P$ ) foi constituída com duas estações de medições, PT1 e PT2, instaladas próximo à linha de costa, como mostra a Figura 1.

Os dados *in situ* foram medidos usando dois perfiladores acústicos de medição de ondas, o *Acoustic Wave and Current Meter* (AWAC) e o AQUADOPP PROFILER, posicionados em profundidades de 3 e 6 m (Tabela 1). Os levantamentos *in situ* ocorreram no período de 07 a 22 de fevereiro de 2011 (PT1) e de 23 de novembro de 2010 a 07 de janeiro de 2011 (PT2). Embora, a região tenha outras campanhas de levantamentos de dados de ondas, a opção por estas datas se deu em função de serem a maior quantidade de dias contínuos medidos em ambos os locais, sendo que as outras campanhas realizaram levantamentos com intervalo temporal de poucos dias.

### 2.2 Modelo Numérico

O modelo numérico SWAN, baseado na equação de balanço espectral de variância (Booij, Ris & Holthuijsen 1999), surge da necessidade de complementar os modelos de terceira geração desenvolvidos, essencialmente, para aplicações operacionais em águas profundas (Fortes, Pinheiro & Santos 2011). Este modelo numérico propaga, no domínio geográfico, o espectro direcional e, conseqüentemente, calcula a evolução das ondas geradas pelo vento em zonas costeiras (Santos et al. 2005). Além disso, efetua o desenvolvimento de um estado de mar por meio da densidade de ação  $N(\sigma, \theta)$ , ao invés de realizar por meio da variação de densidade  $E(\sigma, \theta)$ , já que com a presença de correntes a densidade de ação é conservada enquanto não é a variação de densidade. A densidade de ação é igual à variância de densidade dividida pela frequência relativa ( $N = E/\sigma$ ). As variáveis independentes são as frequências relativas e a direção da onda. No modelo

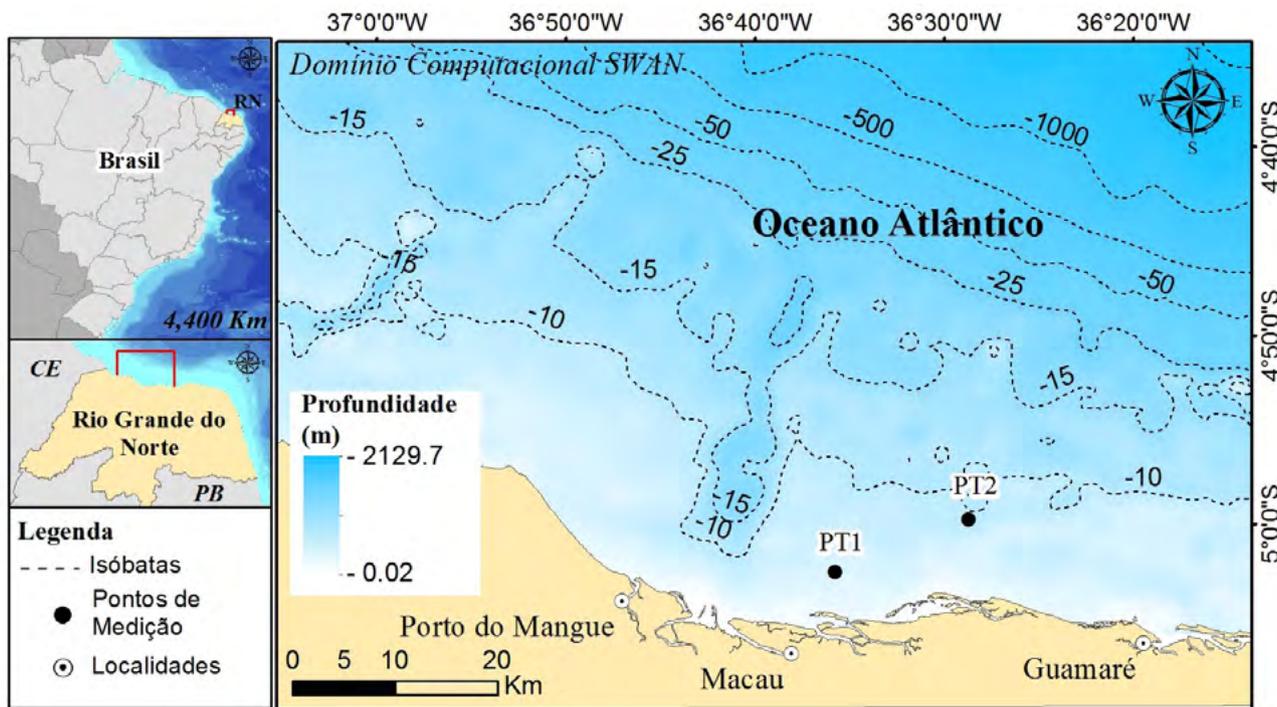


Figura 1 Mapa de localização da área de estudo e domínio computacional. Fonte: Batimetria da Plataforma Continental Brasileira e isóbatas da carta náutica n° 720.

Tabela 1 Localização de cada instrumento de medição em campo.

Estação	Instrumento	Profundidade (m)	Latitude	Longitude
PT1	Aquadopp	3	5°02'37,76"S	36°35'38,64"W
PT2	Awac	6	4°59'50,49"S	36°28'37,57"W

numérico SWAN, a evolução do espectro da onda é descrita por uma formulação Euleriana do balanço de densidade de energia da onda. Na abordagem do balanço de energia Euleriana, o balanço de energia da onda é considerado em células pré-definidas em um sistema de malhas.

A aplicação deste princípio conduz à Equação 1, válida para todos os componentes de frequência na direção do espectro, que é conhecida como a equação de equilíbrio de energia, para águas profundas e na ausência de correntes.

$$\frac{\partial}{\partial t} E + \frac{\partial}{\partial x} (c_x E) + \frac{\partial}{\partial y} (c_y E) = S(\sigma, \theta; x, y, t)$$

Onde  $C_x$  e  $C_y$  são componentes  $x, y$  de um grupo de velocidade corrigido para a propagação de uma corrente com velocidade e  $S(\sigma, \theta; x, y, t)$  é o termo origem que representa todos os efeitos de geração e dissipação (Booij, Ris & Holthuijsen 1999; Westhuysen, Zijlema & Battjes 2007).

Se a equação do balanço de energia é aplicada a regiões costeiras rasas e na presença de correntes, ela é convertida para a equação de equilíbrio de ação espectral para águas rasas da seguinte forma (Equação 2).

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} (c_x N) + \frac{\partial}{\partial y} (c_y N) + \frac{\partial}{\partial \sigma} (c_\sigma N) + \frac{\partial}{\partial \theta} (c_\theta N) = \frac{S(\sigma, \theta; x, y, t)}{\sigma}$$

O primeiro termo, do lado esquerdo da Equação (2), representa a taxa de variação da ação no tempo e o segundo e terceiro termos representam a propagação de ação no espaço geográfico ( $x, y$ ). O quarto e quinto termos representam o desvio de frequência e refração induzida pela profundidade e correntes, respectivamente. O termo fonte  $S(\sigma, \theta)$ , no lado direito da equação engloba todas as fontes e sumidouros associados aos fenômenos físicos que geram, dissipam ou redistribuem a energia da onda e pode ser decomposto (Equação 3) na geração de energia devido ao vento  $S_{in}(\sigma, \theta)$  nas interações não lineares  $S_{nl}(\sigma, \theta)$  e na dissipação da energia  $S_{diss}(\sigma, \theta)$ .

$$S(\sigma, \theta) = S_{in}(\sigma, \theta) + S_{nl}(\sigma, \theta) + S_{diss}(\sigma, \theta)$$

O termo  $S_{diss}(\sigma, \theta)$  descreve ainda três fenômenos: o atrito do fundo  $S_{diss,b}(\sigma, \theta)$ , a rebentação induzida pela diminuição da profundidade  $S_{diss,br}(\sigma, \theta)$ , e a rebentação parcial  $S_{diss,w}(\sigma, \theta)$  (Wamdi Group 1988). Detalhes desses processos podem ser encontrados no manual do SWAN (Swan Team 2012).

No presente estudo, o modelo numérico SWAN foi aplicado no modo estacionário para uma área de grandes dimensões geográficas, onde a escala de tempo de propagação da onda é maior do que a escala de tempo das alterações no vento forçado devido à dimensão da área de interesse.

## 2.3 Configuração do Modelo Numérico SWAN

A partir das condições de fronteira integrando as variáveis batimetria, agitação, campos de ventos e marés, a construção e manipulação dos arquivos de entrada para o modelo SWAN foram realizadas por meio da interface da ferramenta SOPRO (Fortes, Pinheiro & Palha 2007; Fortes, Pinheiro & Santos 2011; Pinheiro et al. 2005; Santos et al. 2005), desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal.

As simulações do modelo SWAN foram realizadas na versão 40.72 AB, no modo estacionário de terceira geração para cada um dos processos, e nas formulações a seguir descritas. Ambos os crescimentos: linear (Komen, Hasselmann & Hasselmann 1984) e exponencial, de entrada do vento foram incluídos no modelo. A dissipação devido à rebentação induzida pelo fundo é tratada por Battjes & Janssen (1978) com a formulação espectral com  $\alpha = 1$ ; o atrito de fundo é modelado usando a formulação JONSWAP (Hasselmann et al. 1973) com coeficiente de atrito  $C = 0,015 \text{m}^2 \text{s}^{-3}$  em condições *wind sea*; e Komen, Hasselmann & Hasselmann (1984) é usado para a formulação *whitecapping* ou excesso de declividade onde é aplicado  $C_{ds} = 2,36 \times 10^{-5}$ , e um coeficiente de rebentação constante igual a 0,65  $\text{m}^2 \text{s}^{-3}$  e as interações entre triades de ondas e interações onda-onda quádrupla.

As condições de agitação ao largo foram obtidas a partir do WAVEWATCH III, é um modelo de previsão e reconstituição de ondas oceânica de terceira geração, desenvolvido pelo *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), o WWIII usa as mesmas equações e formulações hidrodinâmicas empegadas no SWAN, as quais são: refração e tensão do campo de ondas devido as variações temporais e espaciais da profundidade média e corrente média, crescimento e decaimento das ondas devido à influência do vento, interações ressonantes não lineares, dissipação por *white-capping* e fricção do fundo. A bóia do WWIII encontra-se localizada na costa Nordeste do Brasil nas coordenadas: 03°00'0.00"S -36°00'0.00"W, e foram usadas como dados de entrada no modelo numéricos SWAN. Tais estimativas contêm os seguintes parâmetros de onda: HS (onda significativa),  $T_p$  (período médio) e DIR

(direção média para a frequência de pico), obtidas a cada 6 horas, para os anos de 2010 a 2017.

A partir destes valores integrais,  $H_s$  e  $T_p$ , definiu-se um espectro JONSWAP com  $\gamma = 3,3$  para representar a dependência de frequência. O espectro direcional foi discretizado em 23 intervalos de baixa frequência, variando entre 0,04 Hz e 1,0 Hz, com distribuição logarítmica. A discretização em direção abrange 360°, dividida em 90 intervalos.

## 2.4 Equação de Energia das Ondas

As ondas do mar são descritas como compostas de muitas ondas de diferentes frequências, amplitudes e direções (Saket & Etemad-Shahidi 2012). A partir dos resultados obtidos pelo modelo SWAN foi possível calcular o fluxo de energia das ondas. Que pode ser calculado conforme a Equação 4.

$$P = \frac{p g^2}{64\pi} H_s^2 T_e$$

Onde  $P$  é o fluxo de energia das ondas por unidade do comprimento da crista da onda (kW/m),  $p$  é a densidade da água do mar (1025 kg/m<sup>3</sup>),  $g$  é a aceleração da gravidade (9,81 kg/m<sup>2</sup>),  $H_s$  é altura significativa da onda (m) e  $T_e$  é o período (s) de energia das ondas (Kompore et al. 2018).

## 2.5 Validação do Modelo Numérico

Para a validação e calibração do modelo numérico os resultados foram ajustados com dados de medições *in situ* na área de estudo, nos dois pontos próximos à costa PT1 e PT2 (Figura 1). As medições das condições de ondas foram realizadas entre novembro de 2010 e fevereiro de 2011. Para a comparação quantitativa dos resultados foram usadas as seguintes estatísticas:

$$MAPE = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^n \frac{|(O_i - P_i)|}{O_i}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (O_i - P)^2}$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2}$$

O  $MAPE$  é a média do erro percentual absoluto, o  $RMSE$  é o erro médio quadrático e o  $d$  é o índice de concordância ou reajuste (Wilmott 1981), onde  $O_i$  são os valores medidos,  $P_i$  são os valores do modelo numérico,  $\bar{O}$  é a medida do valor experimental e  $n$  é o número de observações.

## 3 Resultados

### 3.1 Validação do Modelo Numérico com os Dados In Situ

Uma análise qualitativa dos resultados da calibração em termos de altura significativa da onda ( $H_s$ , m) e do potencial de energia das ondas ( $P$ , kW/m) é ilustrada nas Figuras 2 e 3. Para a validação foram usados dados do ADCP obtidos em campo em duas campanhas: 07 a 22/02/2011 (PT1), e 23 de novembro de 2010 a 07 de janeiro de 2011 (PT2). Matos et al. (2013) e Matos et al. (2014) descreveram detalhadamente todo procedimento de calibração e validação da implementação do modelo SWAN.

Com base nas duas campanhas de campo, verificou-se  $H_s$  de 1,25 m e 2,05 m (Figuras 2 e 3), respectivamente, em PT1 e PT2, valores próximos à média de 1,96 m registrado por Matos & Amaro (2011) para a mesma região.

Os valores máximos do potencial de energia das ondas registrados para o PT2 alcançaram 20,7 kW/m, durante o pico de  $H_s$  de 2,05 m e período médio de 4,5 s, indicando que em águas costeiras rasas, dependendo da sazonalidade, os picos de  $H_s$  oferecem boa condição do potencial de energia de ondas.

As séries temporais da altura significativa e do potencial de energia das ondas medidas e simuladas mostram respectivamente, um bom ajuste entre os resultados do ADCP e do modelo SWAN, sobretudo no ponto PT2, embora ocorra uma ligeira subestimação dos valores de  $H_s$ .

Na condução do potencial de energia das ondas (Figura 2), o modelo SWAN esteve mais ajustado aos resultados do ADCP, sendo que mesmo nos episódios de picos o modelo conseguiu produzi-los e simular o potencial de energia das ondas.

Para a análise quantitativa dos dados medidos e simulados, a Tabela 2 mostra os resultados da verificação para os períodos analisados conforme a temporalidade de medições em PT1 e PT2. Nota-se que o percentual  $MAPE$  apresentou valores abaixo da média de 50% em três casos, com exceção do valor do potencial de energia das ondas para o PT1,  $P = 53,08\%$ . Na análise do  $RMSE$ , a qualidade dos valores medidos e estimados foi bem conduzida em termos de  $H_s$ ; o índice de concordância foi acima da média em ambos os casos de  $P$ , com  $d = 0,58$  e  $d = 0,55$ , respectivamente.

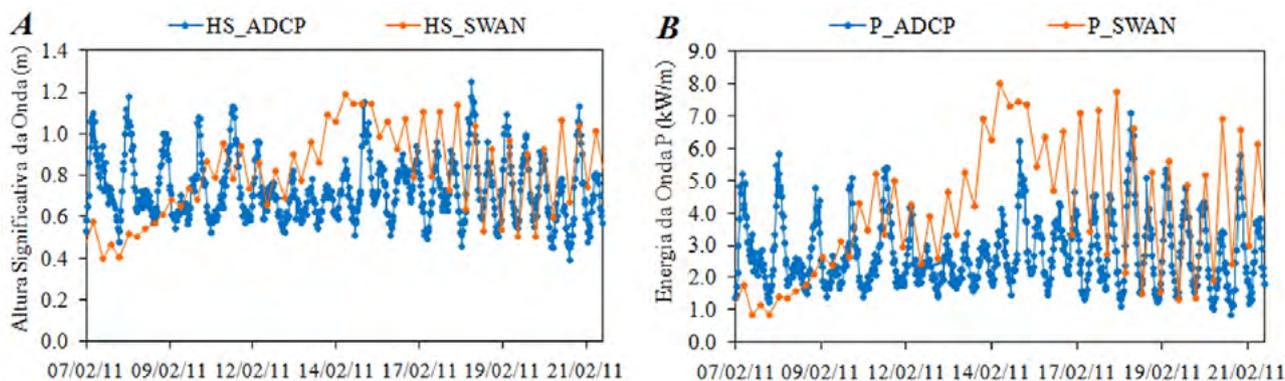


Figura 2 Comparação dos valores medidos e simulados para conjunto de dados de 07 a 22 de fevereiro de 2011 para o PT1: A. Alturas significativas; B. Potencial de energia da onda.

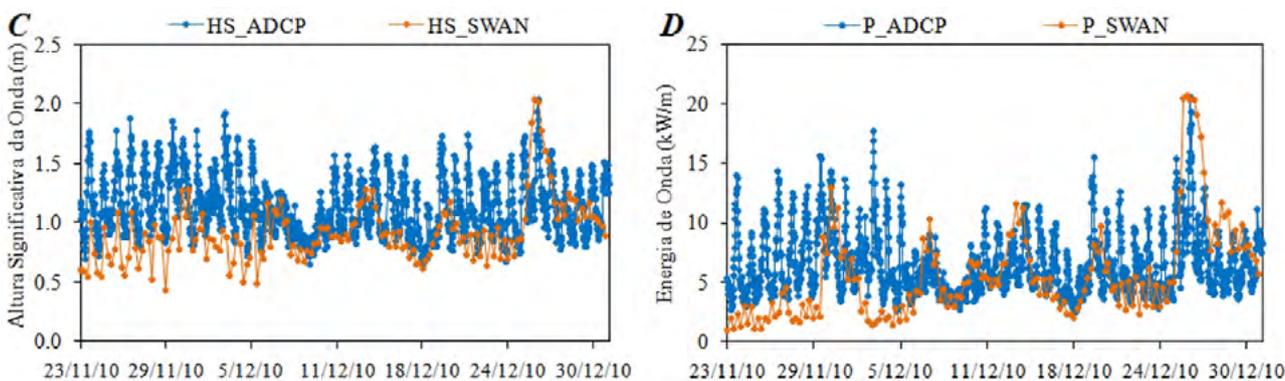


Figura 3 Comparação dos valores medidos e simulados para conjunto de dados de 7 a 22 de fevereiro de 2011 para o PT2: A. Alturas significativas; B. Potencial de energia da onda.

Tabela 2 Análise estatística e medidas de erro dos valores de altura significativa (Hs) e o potencial de energia da onda (P) para os pontos: PT1 e PT2.

Parâmetro	PT1		PT2	
	HS (m)	P (kW/m)	HS (m)	P (kW/m)
MAPE (%)	42,7	53,1	27,4	46,0
RMSE	0,34	1,90	0,40	4,10
d	0,52	0,58	0,49	0,55

### 3.2 Análise Estatística das Ondas Oceânicas

Os ventos alísios, originários do anticiclone subtropical do Atlântico Sul (alísios de sudeste) e do Atlântico Norte (alísios de nordeste) (Carvalho 2010), são fundamentais para o regime de ondas na zona costeira da região Nordeste do Brasil (Silva 2013). Também há contribuição de ciclones extratropicais originários do Hemisfério Norte (HN) para o regime de *swell* nesta região (Innocentini et al. 2001).

Nesta seção são apresentados os resultados anuais da análise da série temporal de 2010 a 2017 das alturas significativas das ondas (Hs), período médio (Tmed) e direções médias (DIR) provenientes das simulações *hindcast* SWAN transferidas para as duas estações *in situ*: PT1 e PT2. Igualmente são apresentados a frequência (%) de ocorrência, indicando assim as principais características e padrões do regime de ondas de cada ano.

Como mostrado nas Figuras 4, 5 e 6, a série temporal demonstrou a propagação anual das ondas para os dois pontos PT1 e PT2, e como se pode observar, há dois

compartimentos sazonais bem definidos ao longo do ano. Apesar do clima de ondas dessa região ser considerado, na escala global, de pouco variabilidade sazonal para Hs (Chu, Galanis & Kuo 2010; Salcedo-Castro et al. 2017; Young 1999), regionalmente verifica-se uma variação de 1,95 m entre as ondas mais elevadas (2,05 m) para as ondas mais baixas ao longo do ano (0,1 m).

Entre os meses de dezembro a março, coincidindo com o ápice do verão e o início do outono na região, é o período de maiores alturas significativas, que variam de 0,5 m a 2,05 m. Valores acima de 2,0 m foram observados principalmente no PT2, durante o mês de fevereiro dos

anos de 2010 e 2013. A partir de então, ocorreram menores alturas, sendo o período entre os meses de junho a setembro onde ocorreu a menor agitação marítima, ou seja, durante o período de inverno e início da primavera, com médias variando entre 0,1 m e 0,5 m.

Os elevados picos de Hs que atingem essa região são influenciados pelos ciclones tropicais e extratropicais que se intensificam no HN durante dezembro, janeiro e fevereiro (DJF) (Semedo et al. 2011) e o posicionamento da ZCIT mais ao sul neste período (Cavalcanti et al. 2009) influenciando, assim, nas ondas que se propagam no litoral do Nordeste voltado para o HN (Silva 2013).

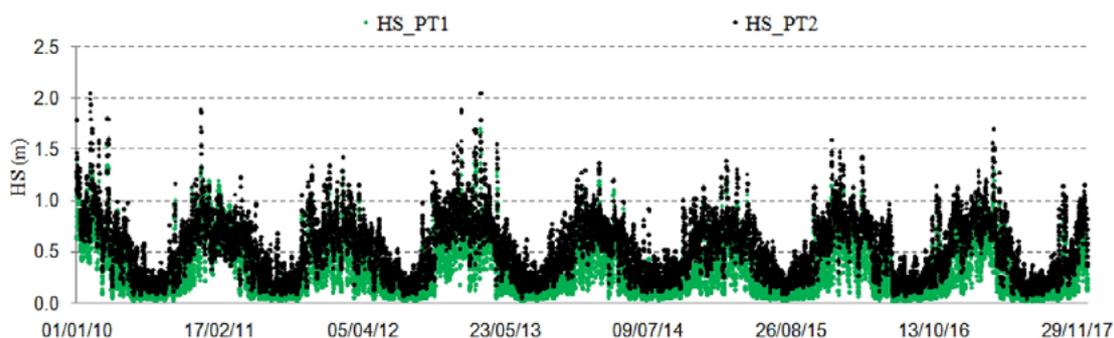


Figura 4 Simulação da altura significativa (HS) do regime de ondas para o PT1 e PT2 de 2010 a 2017.

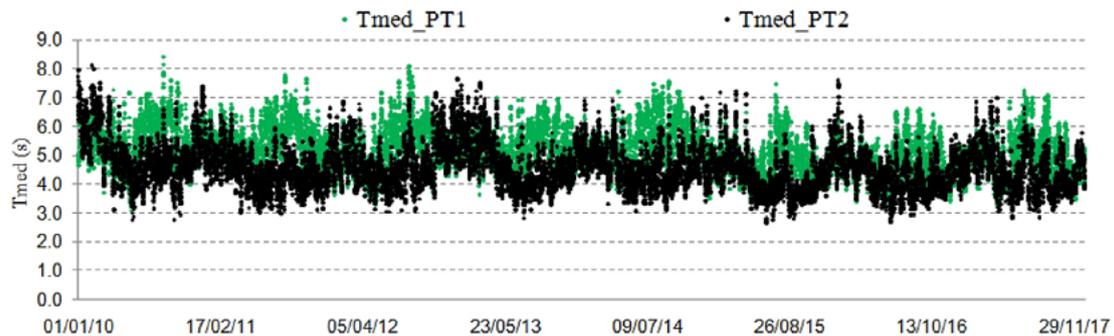


Figura 5 Simulação do período médio (Tmed) do regime de ondas para o PT1 e PT2 de 2010 a 2017.

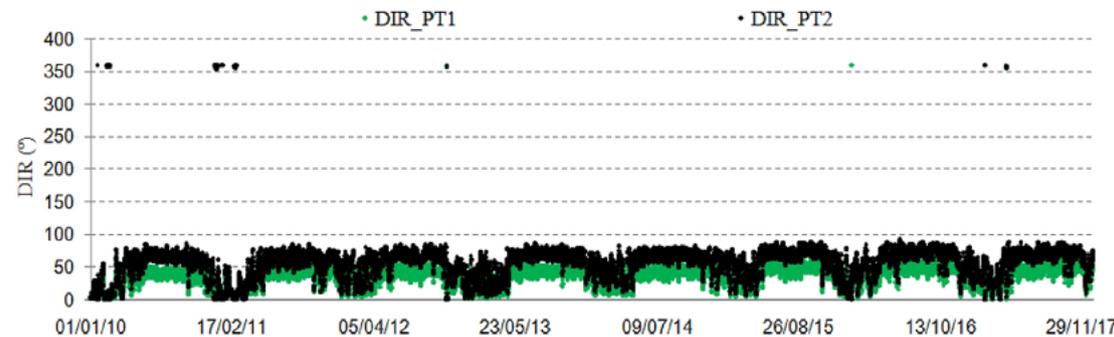


Figura 6 Simulação da direção média (DIR) do regime de ondas, para o PT1 e PT2 de 2010 a 2017.

Em termos de períodos médios ( $T_{med}$ ), verificou-se que as ondas mais longas, com períodos de 7 s a 8,5 s, ocorrem nos meses que caracterizam o verão (DJF), reduzindo para ondas mais curtas, com períodos variando entre 3,06 s e 2,6 s (PT1 e PT2) durante o inverno na região.

Apesar de ser a região afetada durante todo o ano por ventos fracos de leste (Salcedo-Castro et al. 2017; Young 1999) os padrões de direções médias (Figura 6) mostram que as ondas incidentes na região entre os meses de dezembro a março propagam-se, predominantemente, de NNW (Norte-Noroeste) a NNE (Norte-Nordeste), sendo estas associadas às ondas mais elevadas. A partir do final do mês de março até o mês novembro as direções passam a propagar-se de NE (Nordeste) e frentes de ondas de ENE (Leste-Nordeste).

A distribuição das frequências da série analisada apresenta variações entre estações (Figura 7): no PT1 as frequências de 0,20 m representam aproximadamente 50% das alturas significativas que ocorrem no PT2 as alturas significativas entre 0,40 e 0,80 m são as mais frequentes, somando mais de 80% em relação às demais frequências.

Quanto aos períodos médios destacaram-se as frequências de 4,8 s no PT1, representando mais de 30% das frequências. Entretanto, períodos de 5,2 a 7,0 s são frequentes ao longo dos anos de análise. No PT2, os períodos médios de 4,5 s possuem maior distribuição de ocorrência ao longo da série temporal, representando mais de 40% em relação às demais frequências.

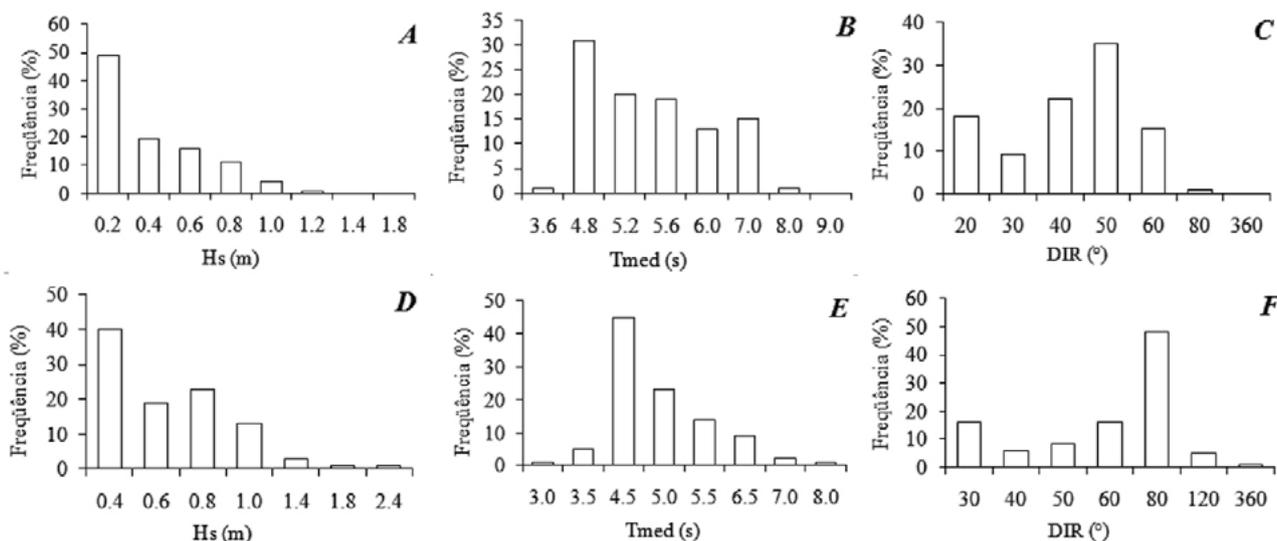
Embora ao longo do ano as direções médias variem de NNW a ENE, a distribuição das frequências da série

temporal mostrou que a região é dominada por ondas de NE e ENE. As direções são relativamente constantes durante todo o ano. Isso indica que a geometria da plataforma continental setentrional, com orientação para NE, impede que os sistemas provenientes do HN penetrem com maior intensidade no Hemisfério Sul (HS) (Semedo et al. 2011; Young 1999).

### 3.3 Caracterização da Variabilidade Interanual do Potencial de Energias das Ondas

O potencial de energia das ondas é distribuído de modo desigual ao longo de todo o planeta (Barstow, Mørk & Lonseth 2009; Cornett 2008; Gunn & Stock-Williams 2012; Jiang & Chen 2013; Magagna & Uihlein 2015; Soares et al. 2014). Nas regiões das latitudes de 30° a 60° são os níveis de potência média mais elevados, entre 20 e 70 kW/m (Barstow, Mørk & Lonseth 2009; López et al. 2013), em direção ao Equador, nas regiões das baixas latitudes, 0°-20°, os campos globais de potencial energético diminuem progressivamente (Soares et al. 2014) entre 15 e 20 kW/m (Barstow, Mørk & Lonseth 2009; Cornett 2008), como por exemplo, as médias que se apresentam para o litoral do RN, que serão apresentados a seguir.

Com base na série temporal analisada, 2010-2017, a distribuição das médias mensais e anuais são apresentadas nas Figuras 8 a 11 para as duas estações costeiras (PT1 e PT2). As figuras mostram que ao longo do ano o potencial de energia das ondas varia significativamente com padrões



**Figura 7** Resultado da simulação do regime de ondas para o intervalo de 2010 a 2017. Para o PT1: A. Alturas significativas; B. Período médio; C. Direções médias. Para do PT2: D. Alturas significativas; E. Período médio; F. Direções médias.

bem definidos para a zona costeira do Rio Grande do Norte. A média entre as condições de alta e baixa energia variam entre 0,02 kW/m a 3,56 kW/m e 0,30 kW/m a 8,22 kW/m, respectivamente, para os PT1 e PT2 (Figuras 8 e 9). Embora, os pontos de referência sejam muito próximos da costa, em profundidades abaixo de -10 m, as médias encontradas estão abaixo dos valores próximos de 11 kW/m encontrados por Espindola & Araújo (2017) em um ponto próximo, distante cerca de 120 km em profundidades de -356 m. Estes autores reanalisaram os dados do ERA-Interim (modelo de reanálise atmosférica global, produzido pelo Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo – ECMWF) para 49 pontos na costa brasileira dos últimos 35 anos. Próximo da costa, as médias possuem uma diferença de 1,8 kW/m em relação à média global que é de 10 kW/m, observada por Gunn & Stock-Williams (2012) e López et al. (2013) para essa região

Com relação aos valores máximos a variação é maior tanto no PT1 quanto no PT2 (Figuras 10 e 11), bem como o comportamento da distribuição dos valores máximos do potencial de energia da onda em relação à média. No PT1, os valores máximos alcançaram 16,7 kW/m em março de 2013, em condições de regime de onda com Hs de 1,69 m e período médio de 6 s. Com exceção de 2010, cuja máxima foi de 14 kW/m, nos demais anos, foi sempre abaixo de 12 kW/m, atingindo o máximo de 11,5 kW/m em janeiro de 2010. No PT2, o potencial de energia máxima da onda tende a ser mais distribuído entre os anos e meses. Verificou-se que o potencial de energia da onda atingiu valores acima de 20 kW/m entre os meses de dezembro a março nos anos de 2010 e 2013.

Os valores máximos e mais elevados do potencial de energia das ondas observadas ocorrem durante os eventos de picos que atingiram a costa nos meses de dezembro a março em 2010 e em 2013. Estes meses recebem maior influência dos sistemas extratropicais, ciclones tropicais, e posicionamento mais ao sul da ZCIT que agem no Atlântico Norte - AN (Semedo et al. 2011), intensificando assim, o regime das ondas e potencial energético nesta região da costa nordestina, embora o *El Niño* possa induzir oscilações significativas nessa região (Barstow, Mørk & Lonseth 2009; López et al. 2013). Isso é percebido nos valores médios de 2010 e 2011 nos meses de DJF (Figura 8 e 9), quando comparadas aos demais anos, provocados pelo comportamento anômalo durante os anos de *El Niño* (Cavalcanti et al. 2009).

Por outro lado, os valores do potencial de energia de ondas abaixo de 1 kW/m estão associados aos meses de junho a setembro, considerados os meses de baixa agitação marítima, sobretudo, o mês de agosto. Neste período esta região recebe pouca influência dos sistemas que agem no AN devido à frequência entre os fenômenos e suas

magnitudes reduzirem significativamente. Ainda neste período, este litoral está sob a influência dos alísios do HS (Semedo et al. 2011), ocasionando além da diminuição da potência das ondas (Espindola & Araújo 2017; Silva 2013), mudanças no comportamento dos padrões direcionais e dos períodos de picos das ondas (Silva 2013).

Embora muitos estudos (Barstow et al. 2008; Cornett 2008; Gunn & Williams 2012; López et al. 2013; Magagna & Uihlein 2015; Mørk et al. 2010; Soares et al. 2014) têm tratado o potencial energético de ondas relacionadas aos valores médios em águas acima de 100 m de profundidade, o que tem servido para estabelecer médias comparativas às análises globais em kW/m, também há um forte interesse em energias das ondas em águas costeiras devido sua significativa variação de escala temporal e espacial (Barstow, Mørk & Lonseth 2009; Gallagher et al. 2016; Kumar et al. 2013; Lavidas & Venugopal 2017; Rusu & Soares 2009). Sugerindo assim, que embora as maiores médias globais do potencial energético de ondas são encontradas em águas profundas, em águas com profundidades (para algumas regiões equatoriais) inferiores a 100 m (denominadas águas rasas ou costeiras) podem oferecer valores de 20 kW/m (Barstow, Mørk & Lonseth 2009).

Considerando a média e a máxima anual (Figura 12), pode-se observar que existe uma distinção anos analisados. Enquanto na análise da média percebe-se uma tendência linear da série, na análise dos valores máximos, pode-se verificar que houve dois momentos de grande crescimento de energia, em 2010 e em 2013 que destoam fortemente em relação aos demais anos.

Em 2010, foi ano típico de *El Niño* oscilação sul, que tende a induzir uma variabilidade interanual nas águas equatoriais (Barstow, Mørk & Lonseth 2009), e da ocorrência dos eventos extratropicais que se intensificam no HN nos meses de DJF (Semedo et al. 2011), resultando em elevados períodos de picos de HS e conseqüentemente no potencial de energia da onda. Em 2013, cujos valores foram ainda superiores em relação à 2010, foi considerado ano neutro, ou seja, a região está submetida aos fenômenos climatológicos regionais. Quando se trata da climatologia do Nordeste, este litoral encontra-se intimamente ligado às interações e constância no regime dos ventos alísios (nordeste e sudeste), favorecendo uma continuidade de recursos energéticos durante o ano todo.

As Figuras 13 e 14 apresentam a distribuição temporal anual dos padrões direcionais do potencial de energia para as estações costeiras PT1 e PT2. A análise mostra que não ocorreu anormalidade de distribuição ao longo dos anos. Os padrões se repetem nas duas estações costeiras. As maiores diferenças estão nos anos em que ocorreram energia de onda mais intenso de N-NE, marcadamente apresentando bi-modais nos anos de 2010,

2011 e 2013 na estação PT1 (Figura 13) e na estação PT2 ocorreu de N, e ENE em 2011 (Figura 14). A ocorrência de padrões de ESE são observados, porém, com percentual de 8% em relação as demais propagações predominantes.

Também se pode avaliar entre as estações costeiras que no PT1, os baixos valores do potencial de energia se propagam com mais intensidade de NE em todos os anos, enquanto que no PT2 são predominantes de ENE.

Em termos de distribuição de ocorrência, as maiores frequências do potencial de energia estão associadas às ondas que se propagam de NE-ENE e E-NE, ou seja, 51% e 72%, PT1 e PT2 (Tabela 3 e 4). Contudo, o potencial máximo de energia está relacionado às condições de propagação menos frequentes, N-NE, 15,8 kW/m e 25,9 kW/m, seguidas do menor percentual (1%) que são propagações de NNW, 6,5 e 20,7 kW/m.

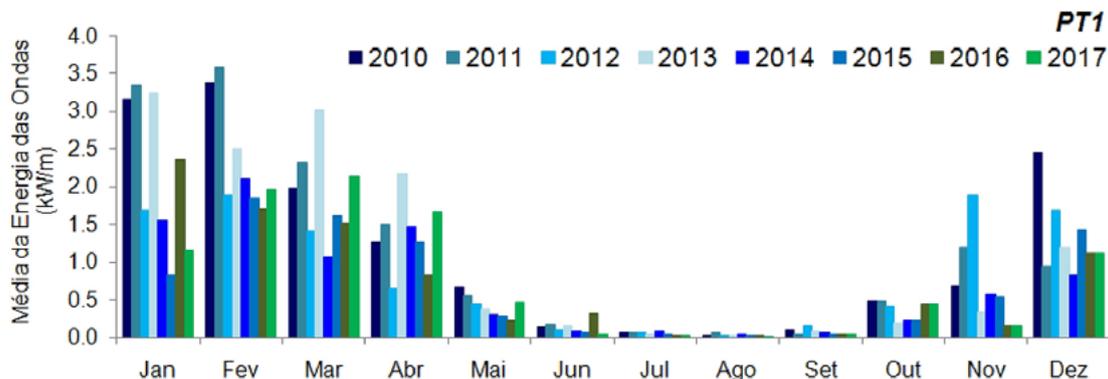


Figura 8 Distribuição mensal dos valores médios do potencial de energia das ondas entre os anos de 2010 e 2017 do PT1.

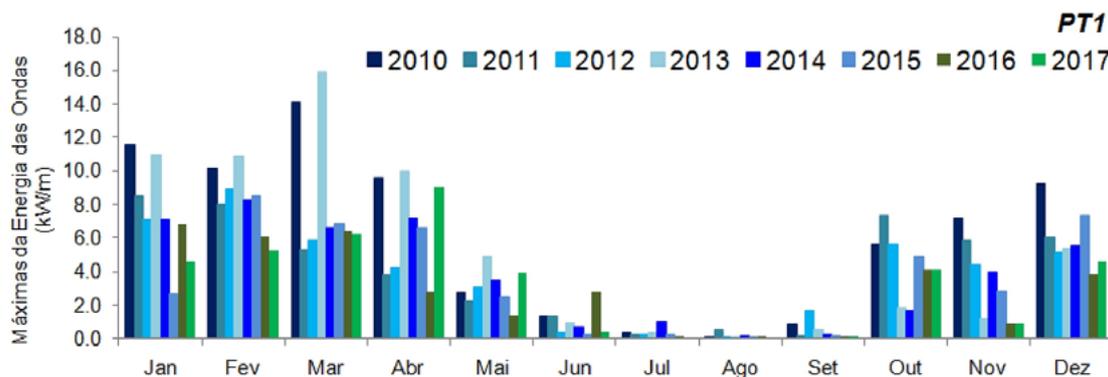


Figura 9 Distribuição mensal dos valores médios do potencial de energia das ondas entre os anos de 2010 e 2017 do PT2.

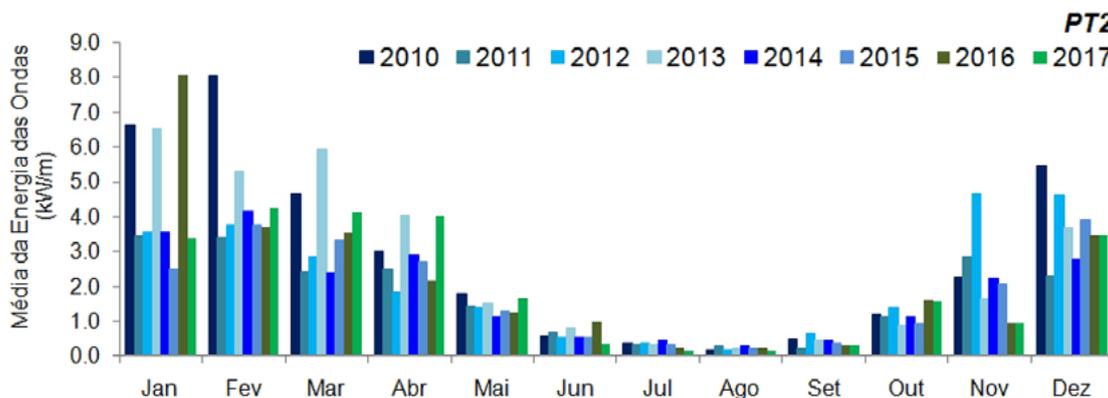


Figura 10 Distribuição mensal dos valores médios do potencial de energia das ondas entre os anos de 2010 e 2017 do PT1.

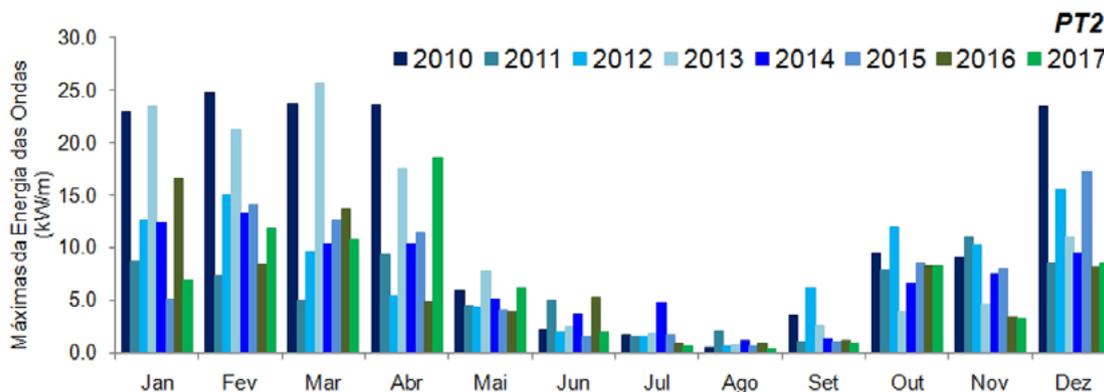


Figura 11 Distribuição mensal dos valores máximos do potencial de energia das ondas entre os anos de 2010 e 2017 do PT2.

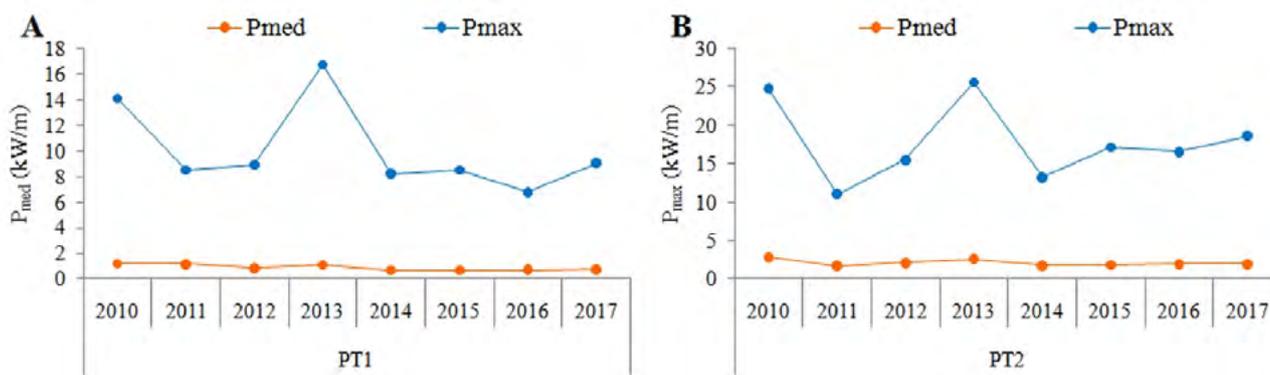


Figura 12 Médias e máximos interanual do potencial de energia das ondas entre os anos de 2010 e 2017 para: A. PT1; B. PT2.

### 3.4 Temporalidade Sazonal do Potencial de Energia das Ondas

Para as variações sazonais foram determinados os valores do potencial máximo ( $P_{max}$ , kW/m) e médio ( $P_{med}$ , kW/m) para as estações costeiras PT1 e PT2 (Figura 15) com base na série temporal de 2010 a 2017. Os dados foram organizados para os meses sazonais de verão (dezembro-fevereiro, DJF), outono (março-maio, MAM), inverno (junho-agosto, JJA) e primavera (setembro-novembro, SON).

Como na Figura 15, o potencial médio mais expressivo de energia das ondas existe no verão, cuja média alcança os 3,57 kW/m no PT1 e 8,07 kW/m no PT2. Diferentemente das médias que se concentram no verão, os valores máximos são mais elevados no início do outono, com 16,7 kW/m e 25,9 kW/m. Com relação ao inverno, há uma redução expressiva tanto nos valores médios (0,03 e 0,9 kW/m) quanto nos valores máximos (2,7 e 5,2 kW/m), respectivamente PT1 e PT2. Na primavera, quando a ZCIT começa a se deslocar no sentido do HS, verifica-se um aumento das médias (1,8 e 4,6 kW/m) e

máximas (7,3 e 11,9 kW/m) do potencial de energia da onda nas duas estações costeiras.

A variabilidade sazonal nesta porção do litoral está intimamente relacionada à sua geometria voltada para o HN (Silva 2013), que recebe influência dos sistemas tropicais e extratropicais que são mais intensos no HN durante o verão (Semedo et al. 2011), embora, a própria geometria que abriga antigas linhas de costa, marcadas pela presença de *beachrocks* impeça, que estes sistemas penetrem na plataforma com maior intensidade (Young 1999).

### 3.5 Distribuição Espacial Sazonal do Potencial de Energia das Ondas

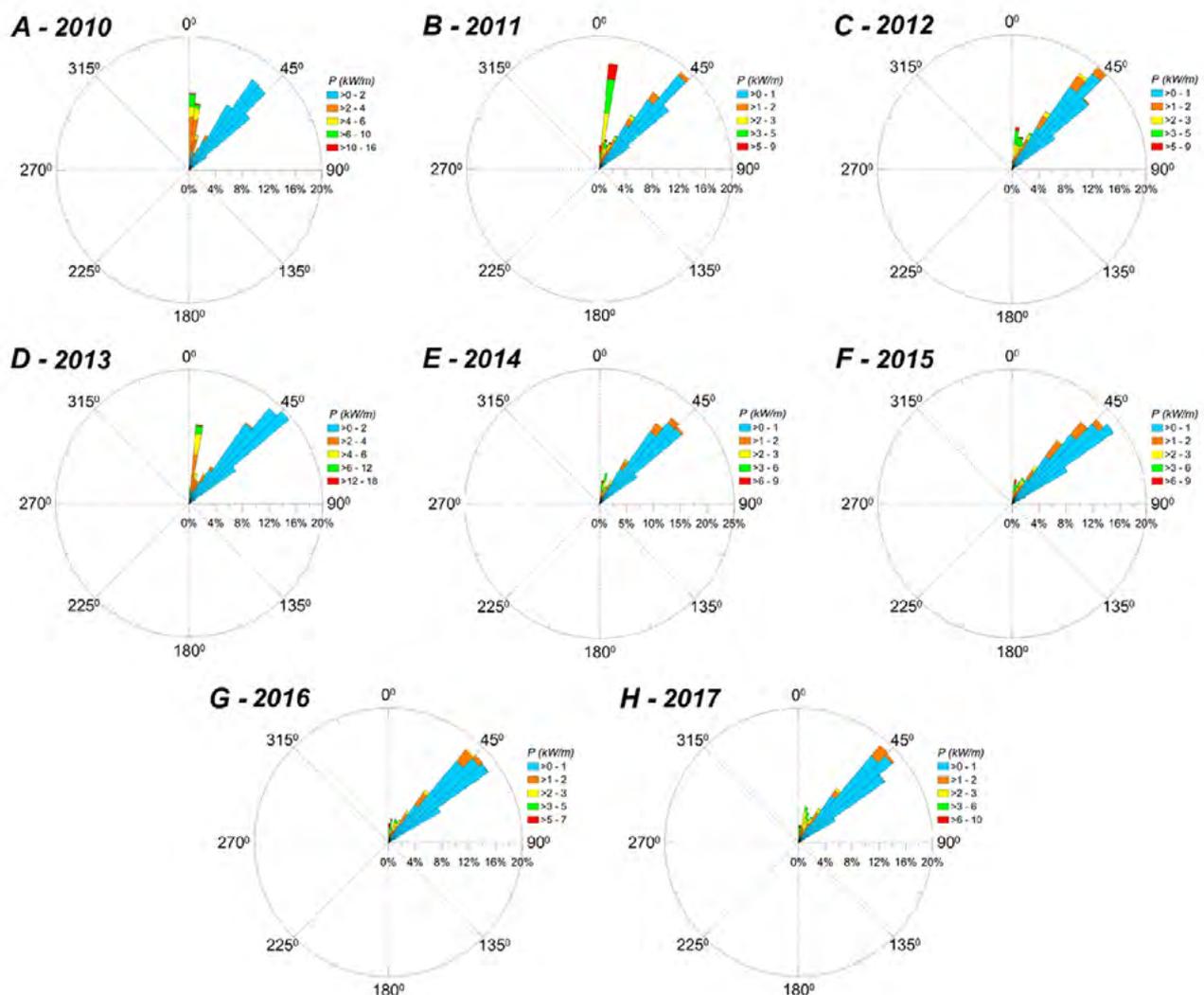
Ao longo do ano, as condições do potencial de energia de ondas são alteradas em função dos fenômenos atmosféricos que ocorrem no HN e tendem a potencializar o regime de ondas na costa do Nordeste, embora alguns estudos de escala global (López et al. 2013; Magagna & Uihlein 2015; Soares et al. 2014; Young 1999) mostrem que as variações zonais para as regiões equatoriais são

caracterizadas por pouca variabilidade sazonal tanto dos ventos, quanto das alturas significativas e potencial de energia de ondas.

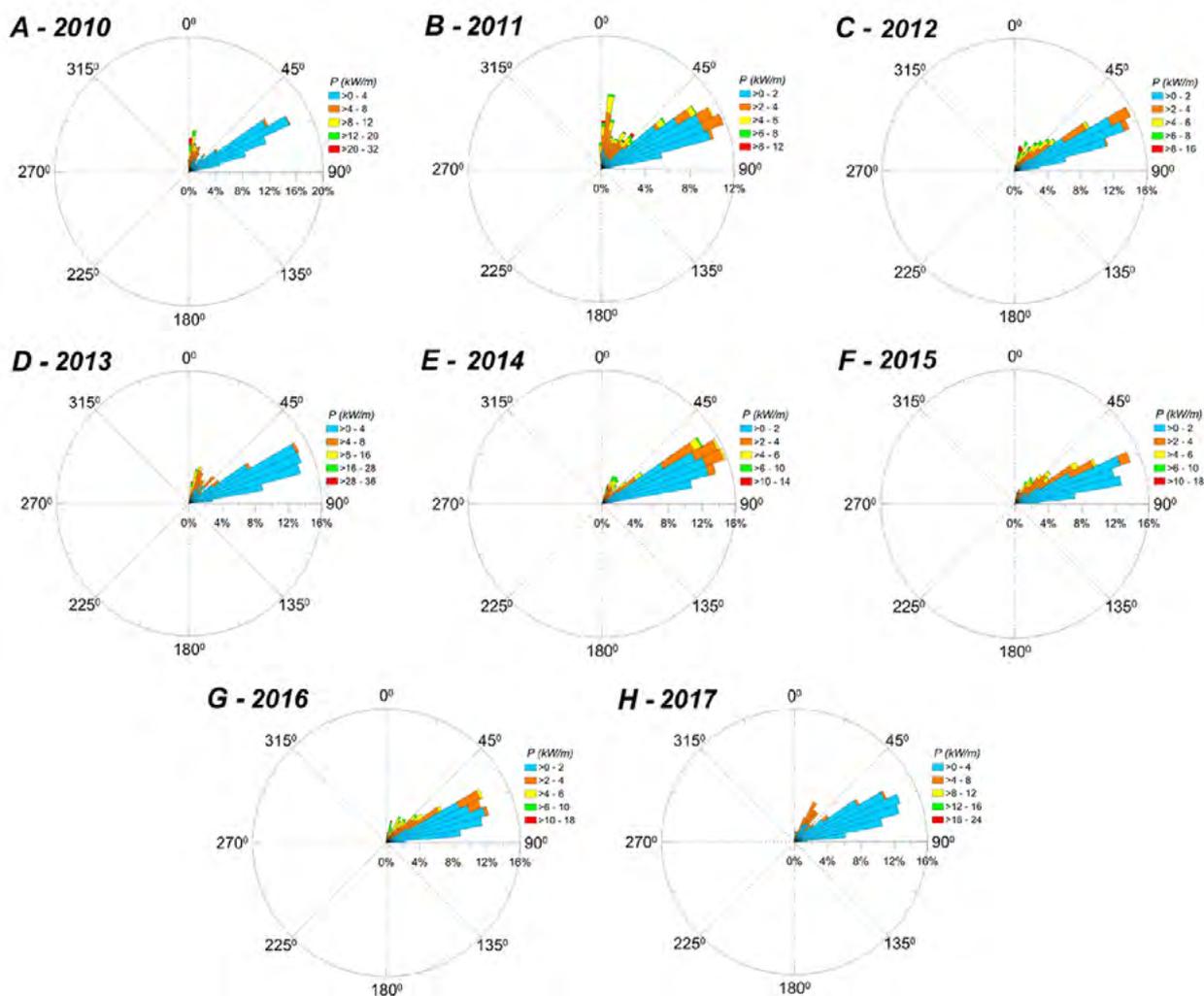
A análise de escala regional mostra que há uma nítida variabilidade sazonal ao longo do ano na plataforma continental (Figura 16). A maior concentração do potencial de energia das ondas é no verão, reduzindo a partir do final do outono e alcançando às médias mais baixas durante o inverno. A partir do final da primavera, o potencial de energia das ondas volta a crescer para atingir os maiores picos no verão. A diferença entre os maiores valores para os mais baixos é de aproximadamente 16,1 kW/m (em relação

as maiores médias), isso significa que o verão tem mais que o dobro do potencial de energia de onda concentrada nesta plataforma continental.

Nos meses de DJF que caracteriza o verão (Figura 16A), marca condições de potencial de energia da onda com valores de 25,7 kW/m nas regiões mais profundas (entre 70 m e 2.000 m), à 0,3 kW/m nas regiões próximas da linha de praia (inferior a 1 m de profundidade). No verão, os valores mais elevados estão associados às características das alturas significativas mais frequentes de 1,9 a 2,0 m e períodos médios das ondas de 8 s, com direção predominantemente de NNW e N.



**Figura 13** Distribuição anual da série temporal (2010-2017) dos padrões direcionais (Dir, °) do potencial de energia das ondas no PT1: A. Direções médias em 2010; B. Direções médias em 2011; C. Direções médias em 2012; D. Direções médias em 2013; E. Direções médias em 2014; F. Direções médias em 2015; G. Direções médias em 2016; H. Direções médias em 2017.



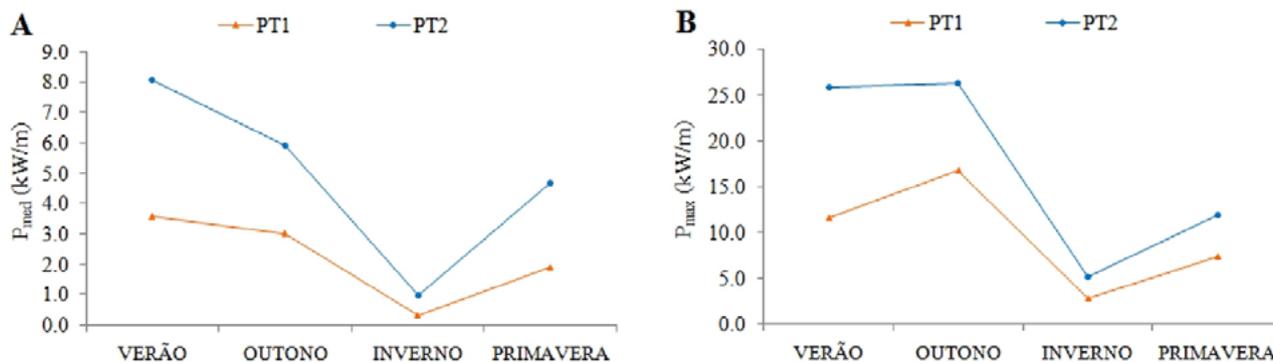
**Figura 14** Distribuição anual da série temporal (2010-2017) dos padrões direcionais (Dir, °) do potencial de energia das ondas no PT2: A. Direções médias em 2010; B. Direções médias em 2011; C. Direções médias em 2012; D. Direções médias em 2013; E. Direções médias em 2014; F. Direções médias em 2015; G. Direções médias em 2016; H. Direções médias em 2017.

**Tabela 3** Estatística descritiva dos valores de potencial de energia da onda (P) para os pontos: PT1.

Estatística Descritiva	N-NE	NE-ENE	NNW
Pmax	16,7	2,21	6,56
Pmed	1,58	0,21	3,68
Pmin	0,02	0,02	1,81
Frequência (%)	48	51	1

**Tabela 4** Estatística descritiva dos valores de potencial de energia da onda (P) para os pontos: PT2.

Estatística Descritiva	N-NE	NE-ENE	ENE	NNW
Pmax	25,9	10,9	1,39	20,7
Pmed	5,05	1,25	0,46	6,21
Pmin	0,49	0,01	0,05	1,44
Frequência (%)	22	72	5	1



**Figura 15** Valores máximos e médios mensais do potencial de energia das ondas entre os anos de 2010 e 2017 para: A. PT1; B. PT2.

Durante o outono (Figura 16B), o potencial de energia da onda tende a ser reduzido, com 17,7 kW/m nos meses de MAM. Embora as maiores concentrações de energia nesse período estejam associadas às alturas significativas de 2 m também, com relação ao período médio, a frequência do potencial de energia da onda está relacionada com períodos de 6 s, ou seja, ondas mais curtas, e com direções predominantes de ENE. Diferentemente do verão, quando se observa um padrão totalmente de NNW (Figura 17), determinado, sobretudo pelos efeitos causados pelos fenômenos originados no HN. Embora o outono ainda seja afetado por tais efeitos, a mudança no comportamento direcional indica alterações nos padrões dos ventos alísios e o enfraquecimento da ZCIT, influenciando assim na redução do potencial de energia de onda.

No inverno (Figura 16C), o potencial de energia de ondas torna-se reduzido em relação ao outono, com valores inferiores a 10kW/m, sendo que o potencial médio mais frequente nesses meses se encontra em 2 kW/m, significando 65 % do total, para períodos de ondas curtas, de 4,8 s e padrões direcionais de ESE. Conforme se observa nas regiões próximas da costa, onde estão localizadas as estações costeiras PT1 e PT2, a energia é reduzida a valores inferiores a 1 kW/m. Tais valores reduzidos se estendem e se prolongam em toda a área até a isóbata de 10 m de profundidades. Essa energia muito baixa nessa região da costa norte do RN, é influenciada, sobretudo, pelos fenômenos físicos (refração e difração) de transformação que a onda está submetida em plataformas rasas.

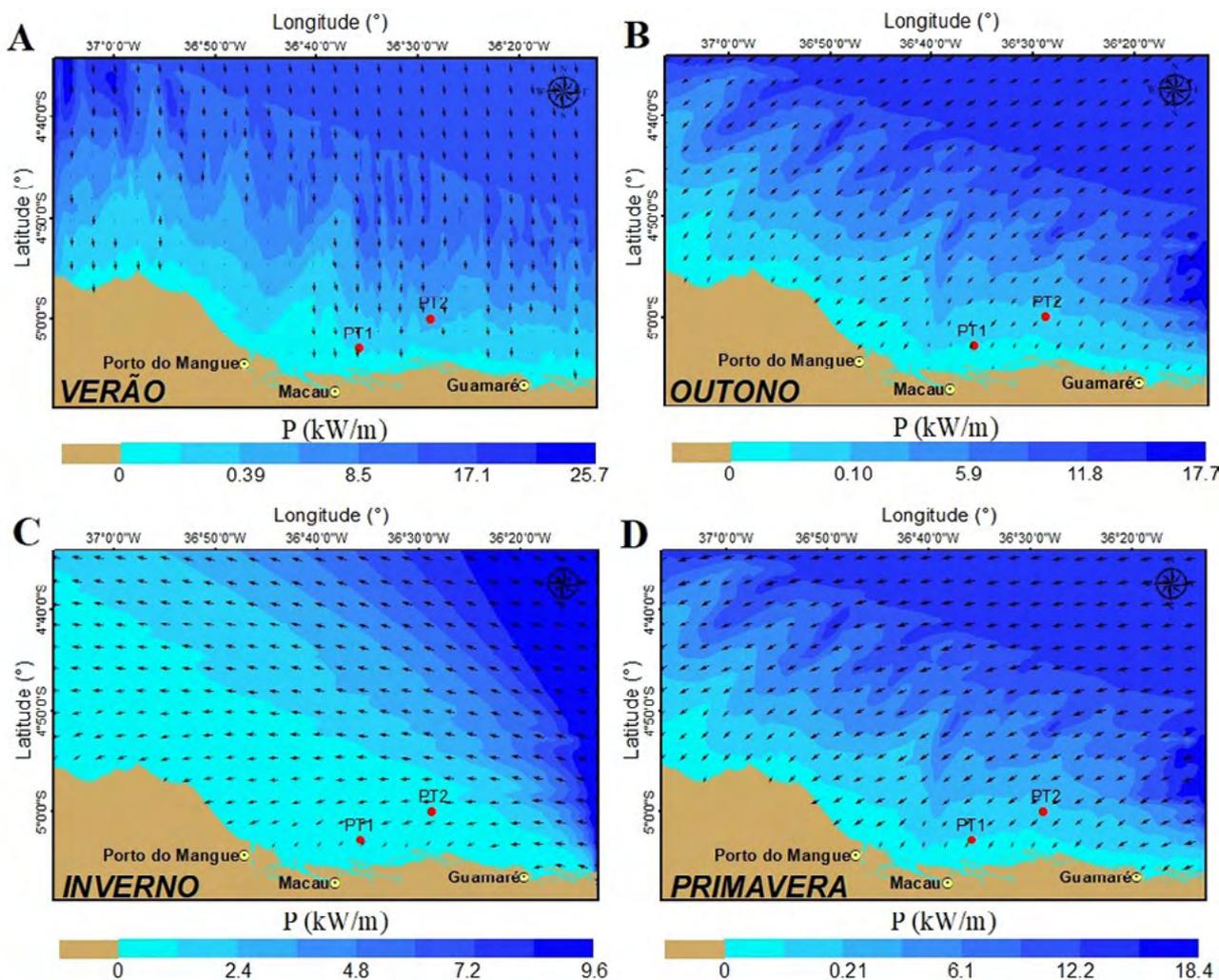
Durante o inverno (Figura 16C), do regime de ondas e das condições de potencial energético são similares em termos de baixa agitação marítima. A principal condição característica durante o período do inverno, é a predominância das ondas de E nesta região.

Na primavera (Figura 16D), de maneira geral, o comportamento do potencial de energia da onda é similar ao apresentado no outono. O potencial de energia da onda

volta a ascender para valores acima de 10 kW/m, chegando a alcançar nas áreas superiores a 15 m de profundidades, médias de 18 kW/m. Embora, os valores sejam mais altos, a média mais frequente de energia de ondas na primavera são de 10 kW/m para frequência de alturas significativas de 2 m com períodos médios de 6 s, e padrões direcionais de E, ou seja, o regime de ondas, influenciados pelos ventos alísios originários do anticiclone subtropical do Atlântico Sul (alísios de sudeste) e do Atlântico Norte (alísios de nordeste) nesta costa (Carvalho 2010), voltam a aumentar até alcançarem as maiores intensidades durante o verão.

A variabilidade sazonal é uma característica marcante deste litoral, causadas pelas alterações de deslocamento e comportamento dos sistemas frontais que intensificam o potencial de energia da onda. Outra característica evidente deste litoral são as propriedades do ambiente e dos fenômenos físicos associados à variabilidade sazonal. As condições de energias de ondas mais elevadas foram observadas nas regiões de águas profundas, sobretudo, na zona onde se evidencia a quebra do talude continental setentrional (Almeida, Vital & Eichler 2017), a partir da isóbata de 70 m, onde as condições de alturas significativas são mais expressivas. Ao atingir o interior da plataforma continental, com profundidades inferiores a 70 m (onde os pontos se localizam PT1 e PT2), o potencial energético mostra-se reduzido durante o ano todo, sobretudo nos meses JJA, devido às condições de energia nas regiões costeiras serem muito diferentes em relação as águas profundas, em função da refração da onda e outros efeitos nas proximidades da linha de costa (Barstow et al. 2008).

O comportamento direcional da variabilidade sazonal mostra conforme as médias determinadas, que há um padrão para cada estação do ano, variando do gradiente de 320° para o 126°, ou seja, de NNW à ESE (Figura 17), conforme a mudança de estação e convecção dos alísios de nordeste e sudeste.



**Figura 16** Distribuição espacial das médias sazonais do potencial de energia das ondas para as estações: A. Verão; B. Outono; C. Inverno; D. Primavera.

Durante o verão (Figura 17A), o potencial de energia das ondas está associado às direções predominantemente de NNW e N, passando a propagar para o gradiente de NE e ENE durante o outono (Figura 17B). Na medida em que se aproximam os meses que compõe o inverno (Figura 17C), as incidências das energias das ondas tornam-se orientadas de ENE a ESE, acumulando até a primavera (Figura 17D), cujas o potencial de energias das ondas está relacionado com as direções do componente ESE.

As direções mostram a influência dos ventos alísios de nordeste e sudeste na região, sendo estes responsáveis pela geração do regime de ondas no Nordeste brasileiro. Observa-se que o potencial de energia das ondas é mais elevado, justamente nos meses em que a influência dos ventos alísios de nordeste (provenientes do HN) são mais

intensos se comparado com os alísios de sudeste (originários do HS), como relata Silva (2013). Além disso, há influência dos ciclones tropicais e extratropicais que se intensificam no HN durante o DFJ (Semedo et al. 2011). Tais fatos confirmam que as ondas e a energia delas próximas ao litoral brasileiro voltado para o HN são mais fortes durante essa estação.

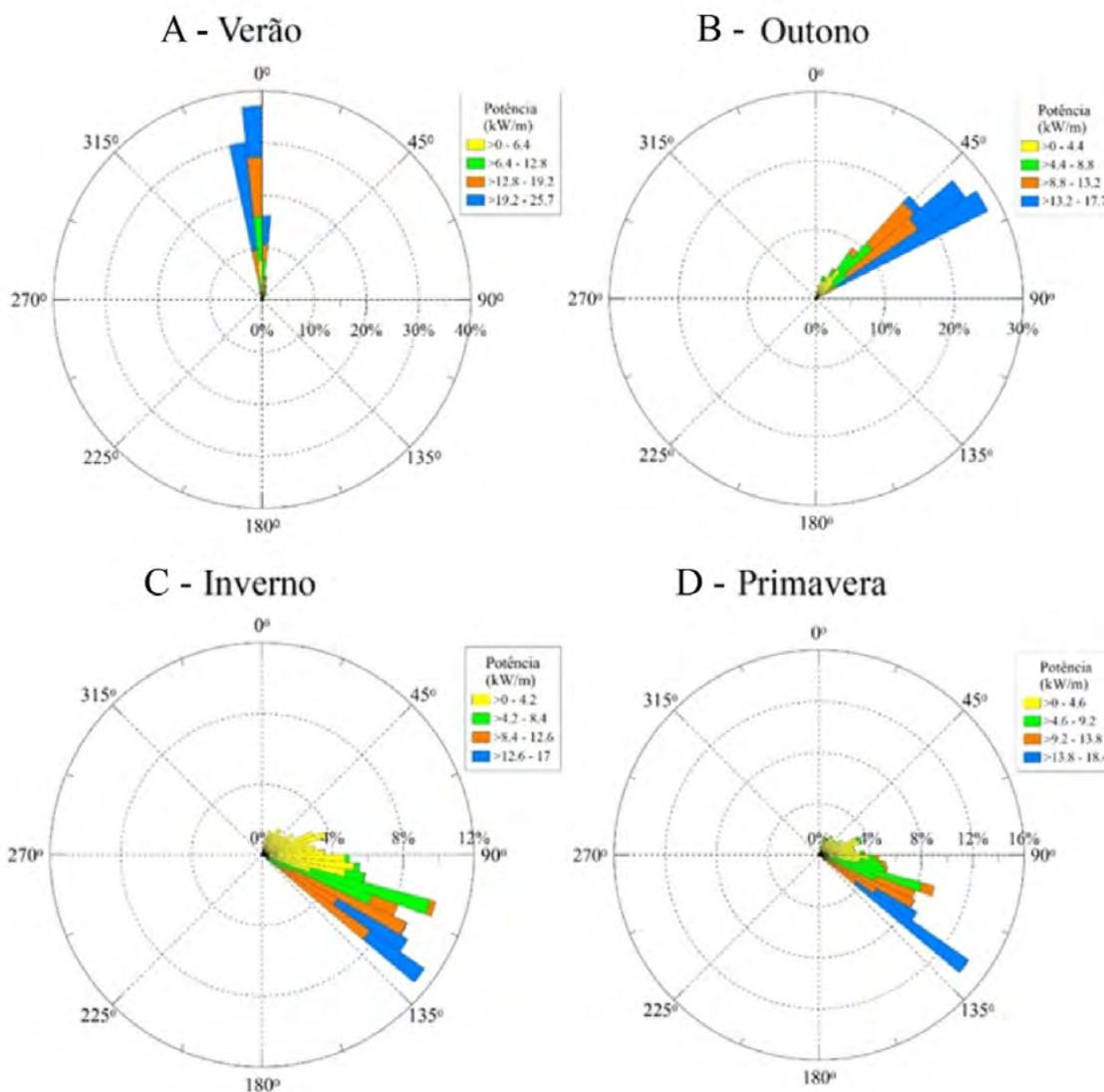
### 3.6 Localização das Altas Energéticas da Costa Setentrional do Rio Grande do Norte

Nesta seção buscou-se mostrar os locais com valores máximos do potencial de energia de onda. A Figura 18 apresenta a agitação máxima na região, a altura significativa

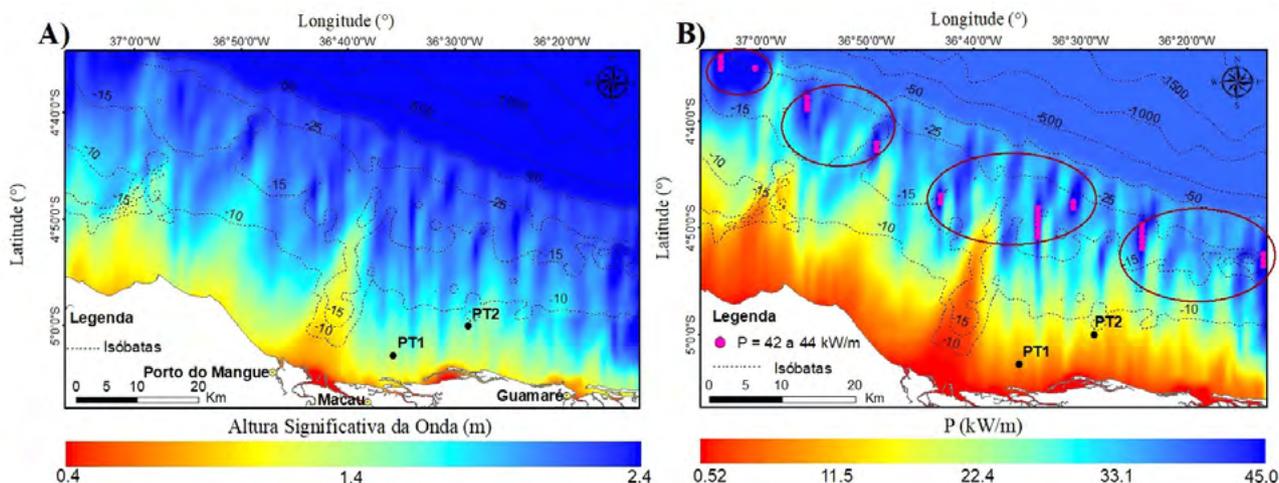
(Hs) e o potencial máximo de energia da onda (P). Portanto, ao longo do percurso da modelagem, 2010 a 2017, extraiu-se o momento em que a agitação máxima ocorreu. Este período foi registrado durante o mês de fevereiro de 2010, e se repetiu no mesmo mês em 2013 e 2016, caracterizando como o mês de altas energéticas nesta região.

Apesar da maior parte do potencial de energia máxima das ondas estarem associadas às maiores alturas significativas (2 m) e períodos médios de ondas (8 s), estas não são tão frequentes ao longo de toda a série, tais alturas máximas são mais representativas nos meses de DJF, sugerindo assim, que o verão é a estação de maior potencial de energia de ondas.

A partir de profundidades acima de 70 m, além do talude continental setentrional, ocorre a região onde foram identificados a maior frequência do potencial de energia de ondas. Contudo, na plataforma continental interna, também foram identificados valores máximos que atingem até 44 kW/m (mês de fevereiro, no verão). Embora na região mais profunda ocorrem ondas com Hs acima de 2 m, estes valores máximos em regiões de águas menos profundas, indicam que previsões do potencial máximo de onda nem sempre coincidem com os locais das alturas significativas máximas (Rusu & Soares 2009). Nos anos seguintes, os valores máximos se reproduziram, porém, variando entre 30 a 38 kW/m.



**Figura 17** Distribuição dos padrões direcionais (Dir,°) das médias sazonais do potencial de energia das ondas (kW/m): A. Médias da direção durante o verão; B. Médias da direção durante o outono; C. Médias da direção durante o inverno; D. Médias da direção durante a primavera.



**Figura 18** Máximo sazonal do fluxo de energia da onda (kW/m) para um dado instante de tempo durante o verão na costa setentrional do RN: A. Altura significativa da onda; B. Potencial máximo de energia da onda.

## 4 Conclusões

Neste trabalho foram investigados o padrão temporal e espacial das características do potencial de energia de ondas na plataforma setentrional do Rio Grande do Norte. Na temporalidade foi avaliado as médias mensais e anual relacionados a dois pontos localizados próximos da zona costeira. Para a distribuição espacial considerou-se a variabilidade sazonal e a identificação das regiões mais energéticas dentro do domínio geográfico da plataforma.

Para determinar e simular o regime de ondas foi usado o modelo espectral de terceira geração, SWAN. A calibração, validação e comparação dos dados foi feita recorrendo a um conjunto de dados obtidos de medições *in situ*, em dois pontos próximos da costa (Figura 1). A verificação da validação foi feita a partir das medidas de erro: *MAPE*, *RMSE* e *d*, resultando em bom ajuste dos dados modelados com os dados medidos. Na verificação, observou-se que há diferenças entre os pontos. A conclusão da validação mostra que o PT1 apresentou melhor ajuste estatístico, de acordo com o índice de concordância, tanto para as alturas significativas das ondas (0,52) quanto para o potencial de energia das ondas (0,58). O PT2 mostrou-se mais bem ajustado em termos de potencial de energia das ondas, com  $d = 0,55$ .

Com relação ao regime das ondas da série temporal, conclui-se que de dezembro a março são os meses das alturas significativas mais elevadas na região, alcançando 2,05 m de  $H_s$  e de junho a setembro é considerado os meses de baixa agitação marítima com valores de  $H_s$  inferior a 0,5 m, sendo os períodos médios mais frequentes as ondas de 5,2 s e 4,5 s com padrões direcionais predominantes de NE (PT1) e ENE (PT2).

Em termos de variabilidade interanual do potencial de energia das ondas, os anos de 2010 e 2013 foram considerados os mais energéticos, tanto as análises médias quanto as máximas, para o PT1 = 3,56 kW/m e 16,7 kW/m, e para o PT2 = 8,22 kW/m e 25,9 kW/m.

De dezembro a março o potencial de energia das ondas são mais intensas, influenciadas pelas maiores alturas significativas de ondas, períodos médios e direções de ondas predominantes de N para NE. De junho a setembro, o comportamento do potencial de energia das ondas é muito baixo, com ondas provenientes de NE a ENE.

A variabilidade sazonal, embora o verão seja considerado uma estação muito energética, foi no outono que a temporalidade se mostrou com maior concentração do potencial de energia da onda, e o inverno a estação de baixa energética.

Com relação à distribuição espacial, o potencial de energia máxima concentra-se no verão com médias de 25,7 kW/m, reduzindo para o outono (17,7 kW/m), e chegando às médias mais baixas durante o inverno com 10 kW/m, assim, na primavera, as médias voltam a aumentar para 18 kW/m. valores estes concentrados sempre nas zonas mais profundas, acima das profundidades de 70 m. Nas regiões inferiores a 60 m, na zona costeira, o potencial energético mostra-se bastante reduzido durante o ano todo, sobretudo, devido as condições de energia nas regiões costeiras serem muito diferentes das águas profundas, em função da refração da onda.

As análises mostraram que a variabilidade interanual e sazonal, é influenciada principalmente pelos fenômenos atmosféricos (os ciclones tropicais, extratropicais e posicionamento mais ao sul da ZCIT) que ocorrem no HN, além da influência do *El Niño*, que tendem a potencializar

o regime de ondas na costa do Nordeste nos meses de DJF. Por outro lado, a menor energia, que ocorre nos meses de JJA que caracteriza o inverno, é marcada pela influência dos alísios do HS devido o deslocamento da ZCIT para o norte, que ocasionam a diminuição da potência das ondas, mudanças no comportamento dos padrões direcionais e dos períodos de picos, enfraquecendo assim o regime e a energia das ondas neste período.

Por fim, em termos de zonas energéticas, o trabalho conclui que a área entre as isóbatas de 15 a 25 m de profundidade, pode obter um potencial de energia das ondas de até 44 kW/m no período do verão.

## 5 Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pelos projetos de pesquisa MOLECO e CRONALOG da Rede Monitoramento: Rede05-PETROMAR/CTPETRO-FINEP/PETROBRAS/CNPq e pelo Projeto UNIVERSAL/CNPq-481386/2012-2. Os autores agradecem ainda a CAPES pela concessão da bolsa de Pesquisa do Programa Nacional de Pós-Doutorado (PNPD/CAPES) a primeira autora do artigo, que permitiu a realização e desenvolvimento do presente trabalho.

## 6 Referências

- Alamian, R., Shafaghat, R., Miri, S.J., Yazdanshenas, N. & Shakeri, M. 2014, 'Evaluation of technologies for harvesting wave energy in Caspian Sea', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 32, pp. 468-76. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.036>
- Almeida, N.M., Vital, H. & Eichler, P.P.B. 2017, 'Aspectos sedimentológicos do talude continental setentrional do Rio Grande do Norte, NE do Brasil', *Pesquisas em Geociências*, vol. 44, no. 3, pp. 537-53. <http://dx.doi.org/10.22456/1807-9806.83277>
- Akpinar, A. & Kömürçü, M.İ. 2012, 'Wave energy potential along the south-east coasts of the Black Sea'. *Energy*, vol. 42, pp. 289-302. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.03.057>
- Akpinar, A.; Van Vledder, G.P.; Kömürçü, M.İ. & Özger, M. 2012, 'Evaluation of the numerical wave model (SWAN) for wave simulation in the Black Sea', *Continental Shelf Research*, vol. 50, no. 19, pp. 80-99. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2012.09.012>
- Battjes, J.A. & Janssen, J.P.F.M. 1978, 'Energy loss and set-up due to breaking of random waves', *Proceedings of International Conference on Coastal Engineering*, pp. 569-87. <https://ascilibrary.org/doi/10.1061/9780872621909.034>
- Barstow, S., Mørk, G., Mollison, D. & Cruz, J. 2008, 'The wave energy resource', in J. Cruz (ed.), *Ocean Wave Energy, Current status and future perspectives*, Springer, Switzerland, pp. 93-132.
- Barstow, S., Mørk, G. & Lonseth, L. 2009, 'WorldWaves wave energy resource assessments from the deep ocean to the coast', *Proceedings of the 8th European Wave and Tidal Energy Conference*, pp. 149-59. [http://www.homepages.ed.ac.uk/shs/Wave%20Energy/EWTEC%202009/EWTEC%202009%20\(D\)/papers/245.pdf](http://www.homepages.ed.ac.uk/shs/Wave%20Energy/EWTEC%202009/EWTEC%202009%20(D)/papers/245.pdf)
- Bernhoff, H., Sjostedt, E. & Leijon, M. 2006, 'Wave energy resources in sheltered sea areas: a case study of the Baltic Sea', *Renewable Energy*, vol. 31, pp. 2164-70. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.10.016>
- Beyene, A. & Wilson, J.H. 2007, 'Digital mapping of California wave energy resource', *International Journal Energy Research*, vol. 31, pp. 1156-68. <https://doi.org/10.1002/er.1326>
- Booij, N., Ris, R.C. & Holthuijsen, L.H. 1999, 'A Third-generation Wave Model for Coastal Regions, Part I, Model Description and Validation', *Journal of Geophysical Research*, vol. 104, no. 4, pp. 7649-66. <https://doi.org/10.1029/98JC02622>
- Carvalho, J.T. 2010, 'Simulação da distribuição de energia das ondas oceânicas ao largo do litoral brasileiro', PhD thesis, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. <http://mtc-m16d.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m19/2010/09.27.19.33/doc/publicacao.pdf>
- Cavalcanti, I.F.A., Ferreira, N.J., Silva, M.G.A.J. & Dias, M.A.F.S. 2009, *Tempo e clima no Brasil*, Editora Oficina de textos, São Paulo, São Paulo.
- Chen, F., Lu, S.M., Tseng, K.T., Lee, S.C. & Wang, E. 2010, 'Assessment of renewable energy reserves in Taiwan', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp. 2511-28. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.06.021>
- Cornett, A.M. 2008, 'A global wave energy resource assessment', *International Offshore and Polar Engineering Conference*, Vancouver, CA, pp. 318-26.
- Chu, P.C., Galanis, G. & Kuo, Y.H. 2010, 'Statistical structure of global significant wave heights', *Conference on Probability and Statistics in Atmospheric Sciences*, Atlanta, USA, pp. 1-6.
- Czech, B. & Bauer, P. 2012, 'Wave energy converter concepts: design challenges and classification', *Industrial Electronics Magazine*, vol. 6, pp. 4-16. <https://doi.org/10.1109/MIE.2012.2193290>
- Defne, Z., Haas, K.A. & Fritz, H.M. 2009, 'Wave power potential along the Atlantic coast of the southeastern USA', *Renewable Energy*, vol. 34, pp. 2197-205. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.02.019>
- Espindola, R.L. & Araújo, A.M. 2017, 'Wave energy resource of Brazil: An analysis from 35 years of ERA-Interim reanalysis data', *PLoS One*, pp. 1-28. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0183501>
- Falcão, A.F.O. 2010, 'Wave energy utilization: A review of the technologies', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 3, pp. 899-918. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.11.003>
- Falcão, A.F.O. & Henriques, J.C.C. 2019, 'The spring-like air compressibility effect in oscillating-waters-column wave energy converters: review and analyses', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 112, pp. 483-98. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.040>
- Fortes, C.J.E.M., Pinheiro, L. & Palha, A. 2007, 'O pacote de dados SOPRO: evoluções recentes', *Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*, Lisboa, PT, pp. 1-10.

- Fortes, C.J.E.M., Pinheiro, L. & Santos, J.A. 2011, 'SOPRO 3.0 – Evolução do pacote integrado SOPRO', *Vetor*, vol. 21, no. 2, pp. 72-100. <https://periodicos.furg.br/vetor/article/view/690>
- Galabov, V. 2013, 'On the wave energy potential of the Bulgarian Black Sea Coast. Marine and Ocean Ecosystems', *Conference Proceedings of the 13th International Multidisciplinary Scientific Geo Conference*, Albena, SGEM, pp. 831-38.
- Gallagher, S., Tiron, R., Whelan, E., Gleeson, E., Dias, F. & McGrath, R. 2016, 'The nearshore wind and wave energy potential of Ireland: A high resolution assessment of availability and accessibility', *Renewable Energy*, vol. 88, pp. 494-516. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.11.010>
- Gunn, K. & Stock-Williams, C. 2012, 'Quantifying the global wave power', *Renewable Energy*, vol. 44, pp. 296-304. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.01.101>
- Hasselmann, K., Barnett, T.P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D.E., Enke, K., Ewing, J.A., Gienapp, H., Hasselmann, D.E., Kruseman, P., Meerburg, A., Miller, P., Olbers, D.J., Richter, K., Sell, W. & Walden, H. 1973, 'Measurements of wind wave-growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)', *Ergänzungsheft Deutschen Hydrographischen Zeitschrift Reihe*, vol. 8, no. 12, pp. 1-95.
- Hughes, M.G. & Heap, A.D. 2010, 'National-scale wave energy resource assessment for Australia', *Renewable Energy*, vol. 35, pp. 1783-91. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.11.001>
- Iglesias, G., López, M., Carballo, R., Castro, A., Fraguera, J.A. & Frigaard, P. 2009, 'Wave energy potential in Galicia (NW Spain)', *Renewable Energy*, vol. 34, pp. 2323-33. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.03.030>
- Iglesias, G. & Carballo, R. 2010, 'Wave energy and nearshore hot spots: The case of the SE Bay of Biscay', *Renewable Energy*, vol. 35, pp. 2490-500. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.03.016>
- Innocentini, V., Prado, S.C.S.C., Pereira, C.S., Arantes, F.O. & Brandão, I.N. 2001, 'Ocorrência de vagas no Arquipélago de São Pedro e São Paulo: Caso 24 de outubro de 1999', *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol. 16, no. 2, pp. 177-86. <<http://mtc-m16b.sid.inpe.br/col/ctpec.inpe.br/walmeida/2004/11.12.11.14/doc/Luciana.pdf>>
- Jahangir, M.H. & Mazinani, M.M. 2020, 'Evaluation of the convertible offshore wave energy capacity of the southern strip of the Caspian Sea', *Renewable Energy*, vol. 151, no. 9, pp. 1-31. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.01.012>
- Jiang, H. & Chen, G. 2013, 'A global view on the swell and wind sea climate by the Jason-1 Mission: A revisit', *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 30, pp. 1833-41. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-12-00180.1>
- Kim, G., Jeong, W.M., Lee, K.S., Jun, K. & Lee, M.E. 2011, 'Offshore and nearshore wave energy assessment around the Korean Peninsula', *Energy*, vol. 36, pp. 1460-69. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.01.023>
- Kamranzad, B., Etmad-Shahidi, A. & Chegini, V. 2016, 'Sustainability of wave energy resources in southern Caspian Sea', *Energy*, vol. 97, pp. 549-59. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.11.063>
- Komen, G.J., Hasselmann, S. & Hasselmann, K. 1984, 'On the existence of a fully developed wind sea spectrum', *Journal of Physical Oceanography*, vol. 14, pp. 1271-85. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1984\)014<1271:OTEOAF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1984)014<1271:OTEOAF>2.0.CO;2)
- Komporn, W., Ekkawatpanit, C., Kositgittiwong, D. 2018, 'Assessment of ocean wave energy resource potential in Thailand', *Ocean and Coastal Management*, vol. 160, no. 15, pp. 64-74. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.04.003>
- Kumar, V.S., Dubhashi, K.K., Nair, T.M.B. & Singh, J. 2013, 'Wave power potential at a few shallow-water locations around Indian coast', *Current Science*, vol. 40, no. 9, pp. 1219-24. <https://www.jstor.org/stable/24092402>
- Lanfredi, N.W., Pousa, J.L., Mazio, C.A. & Dragani, W.C. 1992, 'Wave-power potential along the coast of the province of Buenos Aires, Argentina', *Energy*, vol. 17, pp. 997-1006. [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(92\)90016-S](https://doi.org/10.1016/0360-5442(92)90016-S)
- Lavidas, G. & Venugopal, V. 2017, 'A 35year high-resolution wave atlas for nearshore energy production and economics at the Aegean Sea', *Renewable Energy*, vol. 103, pp. 401-17. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.11.055>
- Leney-Bluhm, P., Paasch, R. & Özkan-Haller, H.T. 2011, 'Characterizing the wave energy resource of the US Pacific Northwest', *Renewable Energy*, vol. 36, pp. 2106-19. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.01.016>
- Liberti, L., Carillo, A. & Sannino, G. 2013, 'Wave energy resource assessment in the Mediterranean, the Italian perspective', *Renewable Energy*, vol. 50, pp. 938-49. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.08.023>
- Lisboa, R.C., Teixeira, P.R.F. & Fortes, C.J.E.M. 2017, 'Numerical evaluation of wave energy potential in the south of Brazil', *Energy*, vol. 121, pp. 176-84. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.001>
- López, I., Andreu, J., Ceballos, S. & Alegría, I.M. 2013, 'Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 27, pp. 413-34. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.009>
- Magagna, D. & Uihlein, A. 2015, *JRC ocean energy status report. Technology, market and economic aspects of ocean energy in Europe*, EUR 26983, viewed 2 January 2019, <<https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/359b9147-ab4c-4639-b9db-17a6011a255f/language-en>>.
- Marin, F.O. 2009, 'A subcorrente Norte do Brasil ao largo da costa do Nordeste', Master thesis, Universidade de São Paulo. <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/21/21132/tde-22092009-142640/pt-br.php>
- Matos, M.F.A., Fortes, C.J.E.M., Amaro, V.E. & Scudelari, A.C. 2013, 'Comparative analysis of agitation obtained the numeric model (SWAN) in modeling Rio Grande do Norte (Brazil) northern coastal waves and field data', *Revista de Gestão Costeira Integrada*, vol. 13, no. 3, pp. 283-99. <https://doi.org/10.5894/rgci378>
- Matos, M.F.A., Amaro, V.E., Fortes, C.J. & Scudelari, A.C. 2014, 'Interação entre ondas oceânicas e fundo marinho: resultados na plataforma continental setentrional do Rio Grande do Norte', *Revista Brasileira de Geomorfologia*, vol. 15, no. 3, pp. 371-91. <https://doi.org/10.20502/rbg.v15i3.458>
- Mayer, D.A. & Weisberg, R.H. 1993, 'A description of COADS Surface Meteorological Fields and the Implied Sverdrup Transports for the Atlantic Ocean from 30°S to 60°N', *Journal of Physical Oceanography*, vol. 23, pp. 2201-21. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1993\)023<2201:ADOCMS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1993)023<2201:ADOCMS>2.0.CO;2)
- Mørk, G., Barstow, S., Kabuth, A. & Pontes, M.T. 2010, 'Assessing the global wave energy potential', *International Conference*

- on Ocean, Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2010. Shanghai, pp. 1-8. <https://doi.org/10.1115/OMAE2010-20473>
- Nascimento Neto, F.C., Vital, H., Araújo, I.R.F. & Gomes, M.P. 2019, 'Campo de cordões arenosos da plataforma interna setentrional do Rio Grande do Norte, adjacente a Galinhos-Guamaré, Brasil', *Anuário do Instituto de Geociências*, vol. 42, no. 2, pp. 50-58. [https://doi.org/10.11137/2019\\_2\\_50\\_58](https://doi.org/10.11137/2019_2_50_58)
- One Earth Future 2016, *Ocean energy strategic roadmap. Building ocean energy for Europe*, report EUR, p. 1-74
- Onea, F. & Rusu, L. 2019, 'Wave power variation near the Romanian coastal waters', *E3S Web of Conferences*, vol. 103, pp. 1-5. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910301006>
- Pegorelli, C., Dottori, M. & Fortes, J. 2018, 'Evaluating the gravity wave energy potential off the Brazilian coast', *Brazilian Journal of Oceanography*, vol. 66, no. 2, pp. 220-33. <http://dx.doi.org/10.1590/s1679-87592018011706602>
- Pessoa Neto, O.C. 2003, 'Estratigrafia de seqüências da plataforma mista neogênica na Baía Potiguar, margem equatorial Brasileira', *Revista Brasileira de Geociências*, vol. 33, pp. 263-78. <http://papegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/9781/9795>
- Pinheiro, L.V., Fortes, C.J.E.M., Santos, J.A., Neves, M.G., Capitão, R. & Coli, A.B. 2005, 'SOPRO. Caracterização da agitação marítima. Aplicações', *V Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*, Lisboa, pp. 1-10.
- Pontes, M.T., Aguiar, R. & Pires, H.O. 2005, 'A nearshore wave energy atlas for Portugal', *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, vol. 127, pp. 249-55. <https://doi.org/10.1115/OMAE2003-37407>
- Rosman, P.C.C., Neves, C.F., Muehe, D. & Valentini, E.M.S. 2007, *Estudos de vulnerabilidade no Litoral do Rio de Janeiro devido às mudanças climáticas*, Fundação COPPETEC-PENO, viewed 11 August 2017, [http://eadterrazul.org.br/pdf/Documentos/Oficina%20de%20Planejamento%20%20SCSLJ/2%C2%AA%20dia%209.08.14%20Saneamento%20B%C3%A1sico/PENO9501\\_RelatorioFinal\\_VulnerabilidadeLitoralRJ.pdf](http://eadterrazul.org.br/pdf/Documentos/Oficina%20de%20Planejamento%20%20SCSLJ/2%C2%AA%20dia%209.08.14%20Saneamento%20B%C3%A1sico/PENO9501_RelatorioFinal_VulnerabilidadeLitoralRJ.pdf)
- Rusu, E. & Soares, C.G. 2009, 'Numerical modelling to estimate the spatial distribution of the wave energy in the Portuguese nearshore', *Renewable Energy*, vol. 34, pp. 1501-16. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.10.027>
- Rusu, L. & Soares, C.G. 2012, 'Wave energy assessments in the Azores islands', *Renewable Energy*, vol. 45, pp. 183-96. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.02.027>
- Rusu, E. & Rusu, L. 2019, 'Evaluation of the wind power potential in the European nearshore of the Mediterranean Sea', *E3S Web of Conferences*, vol. 103, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910301003>
- Saket, A. & Etemad-Shahidi, A. 2012, 'Wave energy potential along the northern coast of the Gulf Oman, Iran', *Renewable Energy*, vol. 40, no. 1, pp. 90-7. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.09.024>
- Salcedo-Castro, J., Silva, N.P., Camargo, R., Marone, E. & Sepúlveda, H.H. 2017, 'Estimation on extreme wave heights return period from short-term interpolation of multi-mission satellite data: application to the South Atlantic', *Ocean Science Discussion*, vol. 81, pp. 1-17. <https://doi.org/10.5194/os-14-911-2018>
- Santos A.J., Fortes, C.J.E.M., Pinheiro, L. & Neves, M.G. 2005, 'A software package for wave characteristics in ports', *Proceedings of the 12th International Conference of the International Maritime Association of the Mediterranean*, Lisboa. <http://repositorio.Inec.pt:8080/xmlui/handle/123456789/5592>
- Schott, F.A., Fischer, J. & Stramma, L. 1998, 'Transport and pathways of the Upper-layer circulation in the Western Tropical Atlantic', *Journal of Physical Oceanography*, vol. 28, pp. 1904-28. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1998\)028<1904:TAPOTU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1998)028<1904:TAPOTU>2.0.CO;2)
- Semedo, A., Suselj, K., Rutgersson, A. & Sterl, A. 2011, 'A global view on the wind sea and swell climate and variability from ERA-40', *Journal of Climate*, vol. 24, pp. 1461-79.
- Silva, P.E.D. 2013, 'Caracterização do padrão de ondas na costa do Brasil por meio de modelagem numérica', Master thesis, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. <http://mtc-m16d.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m19/2013/03.12.16.55/doc/publicacao.pdf>
- Silveira, I.C.A., Miranda, L.B. & Brown, W.S. 1994, 'On the origins of the North Brazil Current', *Journal of Geophysical Research*, vol. 99, no. 11, pp. 22501-12. <https://doi.org/10.1029/94JC01776>
- Soares, C., Bento, A.R., Gonçalves, M., Silva, D. & Martinho, P. 2014, 'Numerical evaluation of the wave energy resource along the Atlantic European coast', *Computers & Geosciences*, vol. 71, pp. 37-49. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.03.008>
- Stopa, J.E., Cheung, K.F. & Chen, Y.L. 2011, 'Assessment of wave energy resources in Hawaii', *Renewable Energy*, vol. 36, pp. 554-67. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.07.014>
- Sumer, V., Zhanaltay, Z. & Parkhomchik, L. 2019, 'Renewable energy in Kazakhstan: potential and challenge', in D. Kurochkin, E. Shabley & E. Shitlu (eds), *Renewable Energy*, Palgrave Macmillan, Cham., p. 221-9. <http://www.rericjournal.ait.ac.th/index.php/reric/article/view/2333>
- Swan Team 2012, *SWAN technical documentation. SWAN cycle II version 40.51*, Delft University of Technology, viewed 5 July 2019, <<http://falk.ucsd.edu/modeling/swantech.pdf>>.
- Testa, V. & Bosence, D.W.J. 1998, 'Carbonate-siliciclastic sedimentation on high energy, ocean-facing, tropical ramp, NE Brazil', in V.P. Wright & T.P. Burchette (eds), *Carbonate Ramps*, Geological Society, p. 55-71. <http://repositorio.ufba.br/ri/handle/ri/13823>
- Vital, H., Statterger, K., Amaro, V.E., Schwarzer, K., Frazão, E.P., Tabosa, W.F. & Silveira, I.M. 2008, 'A modern high-energy siliciclastic-carbonate platform: continental shelf adjacent to northern Rio Grande do Norte state, Northeastern Brazil', in G.J. Hampson, R.J. Steel, P.M. Burgess & R.W. Dalrymple, *Recent Advances in Models of Siliciclastic Shallow-Marine Stratigraphy (Society for Sedimentary Geology)*, SEPM Special Publication, no. 90, p. 175-88. <https://doi.org/10.2110/pec.08.90>
- WAMDI Group 1988, 'The WAM model - a third generation ocean wave prediction model', *Journal of Physical Oceanography*, vol. 18, pp. 1775-810. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1988\)018<1775:TWMTGO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1988)018<1775:TWMTGO>2.0.CO;2)
- Wang, Y. 2019, 'Efficient prediction of wave energy converters power output considering bottom effects', *Ocean Engineering*, vol. 181, pp. 89-97. <https://doi.org/10.3390/en12224329>

- Waters, R., Engström, J., Isberg, J. & Leijon, M. 2009, 'Wave climate off the Swedish west coast', *Renewable Energy*, vol. 34, pp. 1600-6. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.11.016>
- Westhuysen, A. Van Der., Zijlema, M. & Battjes, J. 2007, 'Nonlinear saturation-based whitecapping dissipation in SWAN for deep and shallow water', *Coastal Engineering*, vol. 54, pp. 151-71. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2006.08.006>
- Wilmott, C.J. 1981, 'On the validation of models', *Physical Geography*, vol. 2, pp. 1984-94. <https://doi.org/10.1080/02723646.1981.10642213>
- Young, I.R. 1999, 'Seasonal variability of the global ocean wind and wave climate', *International Journal of Climatology*, vol. 19, pp. 931-50. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(199907\)19:9<931::AID-JOC412>3.0.CO;2-O](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(199907)19:9<931::AID-JOC412>3.0.CO;2-O)

#### Contribuições dos Autores

**Maria de Fátima Alves de Matos:** Conceituação; análise formal; metodologia; validação; redação – rascunho original; redação – revisão e edição; obtenção do financiamento; supervisão; visualização. **Ada Cristina Scudelari:** Conceituação; análise formal; metodologia; redação – rascunho original; redação – revisão e edição; obtenção do financiamento; supervisão; visualização. **Venerando Eustáquio Amaro:** Conceituação; análise formal; metodologia; redação – rascunho original; redação – revisão e edição; obtenção do financiamento; supervisão; visualização.

#### Financiamento

CNPq, Processo N° UNIVERSAL/CNPq-481386/2012-2, Bolsa de pós-doutorado do programa PNPd/CAPES, processo N° 88882.306000/2018-01.

#### Conflito de interesse

Os autores não possuem potenciais conflitos de interesse.

#### Declaração de disponibilidade de dados

Todos os dados incluídos neste estudo estão disponibilizados publicamente na literatura.

#### Editora-chefe

Dra. Claudine Dereczynski.

#### Editora-associada

Dra. Claudine Dereczynski.

**Como citar:** Matos, M.F.A., Scudelari, A.C. & Amaro, V.E. 2022, 'Variabilidade Interanual do Potencial Energético das Ondas Oceânicas na Costa Setentrional do Rio Grande do Norte, Atlântico Equatorial Sul', *Anuário do Instituto de Geociências*, 45:46460. [https://doi.org/10.11137/1982-3908\\_45\\_46460](https://doi.org/10.11137/1982-3908_45_46460)