

ESTIMATIVA DOS PERÍODOS DE RETORNO DA VELOCIDADE E RAJADA DO VENTO E ALTURA SIGNIFICATIVA DAS ONDAS NO ATLÂNTICO SUDESTE

Emille Mazzaro Dias

emille.mazzaro@gmail.com
Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Ana Cristina Pinto de Almeida Palmeira

anactn@gmail.com
Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Renata Libonati

renata.libonati@igeo.ufrj.br
Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

RESUMO

A região do Atlântico Sudoeste abriga as duas principais bacias petrolíferas do Brasil: a Bacia de Campos e a Bacia de Santos. Nestas regiões, o estudo dos eventos extremos e a estimativa de nível de retorno são questões cruciais para garantir a segurança estrutural de navios, plataformas *offshore* e construções costeiras. O conhecimento do regime de ondas e vento de uma região é indispensável, pois a partir dessa análise é possível estimar a carga energética que uma estrutura pode ser submetida durante sua vida útil. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo estimar o nível de retorno de 100 anos das variáveis: altura significativa das ondas (H_s), velocidade e rajada do vento à 10 m para cada direção nas duas principais bacias petrolíferas do Brasil. Para isso, foram utilizados os dados da Reanálise ERA5 do ECMWF durante o período de 1979-2019 e o modelo estatístico *Peaks Over Threshold* (POT), utilizando o estimador de Máxima Verossimilhança. Os resultados demonstram que as direções SE, S e NW retornaram os maiores valores de nível de retorno para velocidade do vento. Conforme análise do resultado das rajadas, os maiores valores ficaram entre 20 m/s e 30 m/s e considerando o intervalo de confiança mais alto, os valores chegaram a 38,64 m/s para a direção S. Nos resultados das estimativas de nível de retorno para H_s constatou-se que as maiores ondulações foram de SW. Com isso, conclui-se que: apesar dos dados observados *in situ* serem preferíveis ao se realizar um estudo de extremos, a reanálise é uma ótima alternativa para locais limitados de dados coletados. Uma outra constatação foi de que o Modelo POT é uma excelente ferramenta para o estudo de extremos, por ser aprimorado e conseguir selecionar um número mais consistente e maior em valores, em relação a modelos utilizados anteriormente.

PALAVRAS-CHAVE: Vento; Onda; Período de retorno; Bacias petrolíferas.

1. INTRODUÇÃO

Segundo a Agência Nacional de Águas (ANA) a Região Hidrográfica do Atlântico Sudoeste ocupa 2,5% do território nacional abrangendo cinco estados: Minas Gerais, Espírito Santo, Rio de Janeiro, São Paulo e Paraná. Já o Oceano Atlântico Sudoeste abriga, segundo a Agência Nacional do Petróleo (ANP), as duas principais áreas sedimentares já exploradas no setor *offshore* de petróleo e gás do país, a Bacia de Campos (BC) e a Bacia de Santos (BS).

A BC se estende das imediações da cidade de Vitória – ES até Arraial do Cabo – RJ, sendo a segunda Bacia mais importante do país, em relação à produção de petróleo e gás (PETROBRAS, 2020). É considerada um grande laboratório a céu aberto, por ser abrigo de testes das principais tecnologias *offshore*, onde foi possível desenvolver sistemas que posteriormente permitiram extrair o petróleo em águas profundas e ultras profundas. A BC, responsável atualmente pela maior produção de petróleo e gás, é a maior bacia sedimentar *offshore* do país (ANP, 2020). Possui potencial de crescimento, pois nela se encontra a camada do pré-sal que vem sendo explorada desde 2012 por ser composta por grandes acumulações de óleo leve que possui excelente qualidade e alto valor comercial (PETROBRAS, 2020). A extensão da Bacia compreende desde o litoral sul do Rio de Janeiro até a parte norte do estado de Santa Catarina.

Dada a importância econômica da indústria do petróleo e gás para o país, deve-se levar em consideração a segurança das operações *offshore* e a preservação do meio ambiente. Dessa maneira, nos últimos anos as empresas, através de seus diversos órgãos operacionais e de seus centros de pesquisa, desenvolveram procedimentos e tecnologias para mitigar danos causados por acidentes em suas operações, destacando a importância de pesquisas que contribuam para esse fim. Esforços para instalação de medições meteoceanográficas, vêm sendo elaborados, porém ainda insuficientes principalmente sobre o Oceano Atlântico Sul onde a densidade de medições é bem inferior se comparada ao Hemisfério Norte (Babanin *et al.*, 2019), dificultando as pesquisas nessa região. As limitações na implementação de equipamentos sobre o oceano incluem aspectos econômicos (devido ao alto custo e à dificuldade na instalação) bem como a coleta dos dados (devido às instabilidades oceânicas e atmosféricas em seus diversos fenômenos) (Babanin *et al.*, 2019). As coletas *in situ* são comumente relacionadas às boias meteoceanográficas fixas e de deriva e são preferíveis devido ao grau de confiabilidade. Entretanto, as formas remotas de coletas de informações devem ser consideradas. Os satélites são uma excelente alternativa e podem ser aplicados a diversos parâmetros tendo como vantagem a alta resolução espacial e temporal. Em países como o Brasil que não possuem a disponibilidade constante de se obter dados convencionais meteoceanográficos, os satélites passam a

ser opção viável e acessível. Outra forma de estimar o ambiente nas regiões oceânicas é através dos modelos numéricos e dos conjuntos de dados de reanálises meteorológicas, que fornecem medidas de diversos parâmetros em intervalos regulares com longos períodos de tempo, geralmente décadas. Dentre as reanálises, algumas das mais utilizadas são: ERA5 do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) (Hersbach *et al.*, 2019) e *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR) do *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) em sua segunda versão (Saha *et al.*, 2010).

Uma importante variável estudada, para qualquer atividade *offshore*, é o vento. O vento sobre a superfície do oceano provoca efeitos dinâmicos, como induzir uma tensão tangencial de arraste relacionada à velocidade do vento. Essa tensão aplicada à superfície é transmitida para o interior do fluido pelo efeito da viscosidade da água e pela turbulência do escoamento, promovendo assim uma transmissão de momento da atmosfera para o oceano, possibilitando o movimento das águas (Phillips, 1986). O conhecimento das ondas superficiais de gravidade geradas pelo vento está diretamente relacionado com a segurança de atividades ligadas ao oceano, o desenvolvimento dessas ações se baseia em 3 fatores: intensidade do vento, duração e pista, sendo o último relacionado a extensão do espaço em que o vento se manteve constante em direção. Podem ser classificadas em vagas, quando se encontram ainda na zona de geração e/ou estão recebendo energia do vento, e marulhos quando já se propagaram para fora da zona de geração e/ou não recebem energia do vento (Pond e Pickard, 1983).

Na região deste estudo, os eventos de ondas elevadas não são tão frequentes quando comparados com o litoral da África do Sul e com o Atlântico Norte (Candella e Souza, 2013). Porém, quando ocorrem, podem acarretar sérios problemas, pois essas ondas, na maioria das vezes, se formam em locais distantes (marulhos) e possuem grande energia que se propagam até as bacias do litoral brasileiro (Mello Filho *et al.*, 1993).

Destacando a importância do estudo do regime de ventos e ondas para projetos de construção de estrutura *offshore* e costeira, que necessita do conhecimento de condições severas da região, o estudo de valores extremos é indispensável, pois a partir do resultado é possível mensurar e projetar a carga energética que uma estrutura pode vir a ser submetida durante a sua vida útil. Nesse âmbito, o presente trabalho tem como objetivo estimar os níveis de retorno da velocidade e da rajada do vento a 10 m e do Hs para o período de retorno de 100 anos na região da Bacia de Campos e de Santos. A análise de extremos escolhida é a Peaks Over Threshold (POT), pertencente à Distribuição Generalizada de Pareto (GPD), considerada atualmente uma das ferramentas mais consistentes no estudo de extremos, pois consegue

capturar um maior número possível de valores, se comparada com outras distribuições (Silva, 2013). Para a utilização do modelo foram utilizados os dados da reanálise ERA5.

2. DESCRIÇÃO DOS DADOS

Dados

A reanálise ERA5 (Hersbach *et al.*, 2019) do ECMWF veio para substituir a antiga ERA-Interim (Dee *et al.*, 2011) a qual possui resolução espacial de 79 km e resolução temporal de 6 horas. A ERA5 é baseada na assimilação de dados 4D-Var usando o Ciclo 41r2 do *Integrated Forecasting System* (IFS). A mudança do ERA-Interim para a ERA5 representa um ganho na qualidade geral da reanálise e no nível de detalhes, como por exemplo, na resolução espacial, que passa a ter 31 km de espaçamento de grade e 137 níveis de pressão, em comparação com o ERA-Interim que possui 79 km e 60 níveis de pressão.

Para o desenvolvimento deste estudo, foram utilizados os dados de Vento a 10 m (componentes do vento U e V e rajada do vento a 10 m) e dados de onda (Hs). A série temporal utilizada consiste em 41 anos (1979-2019) de dados horários e pontuais da reanálise ERA5. Para os dados de vento foram utilizados 5 locais, enquanto para a Hs foram utilizados 18 locais (Figura 1). Através da Figura 1, são indicados em vermelho os pontos onde foi possível calcular os níveis de retorno para todas as direções, enquanto os pontos em

azul indicam não conter o número mínimo de observações (pelo menos um por ano) em determinadas direções para a realização dos cálculos. Isso ocorre pois os ventos de NW costumam aparecer rapidamente em situação de giro pré-frontal, não contribuindo com a persistência dos ventos que é necessária para formar ondas maduras e relevantes para o estudo.

A escolha dos 5 pontos para o estudo do vento foi derivada de uma análise de *cluster* baseada nos mesmos dados para a região de estudo, enquanto para o estudo da Hs foi utilizado um espaçamento de 1° de latitude e longitude para a escolha dos 18 pontos.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Modelo *Peaks Over Threshold* (POT)

Nesse trabalho foi utilizado o Modelo de Excessos Acima de um Limiar, mais comumente conhecido como *Peaks Over Threshold* - (POT), que é um modelo estatístico da década de 80 para ser empregado na área de hidrologia. Ele passou a ser conhecido através dos trabalhos de Simiu e Heckert (1996), Abild *et al.*, (1992), Hosking e Wallis (1987), onde apresentaram uma nova distribuição denominada Distribuição Generalizada de Pareto (GPD). Esta, foi elaborada para resolver especificamente o problema de estimativa de cauda, em outras palavras, modelar excessos acima de um limiar.

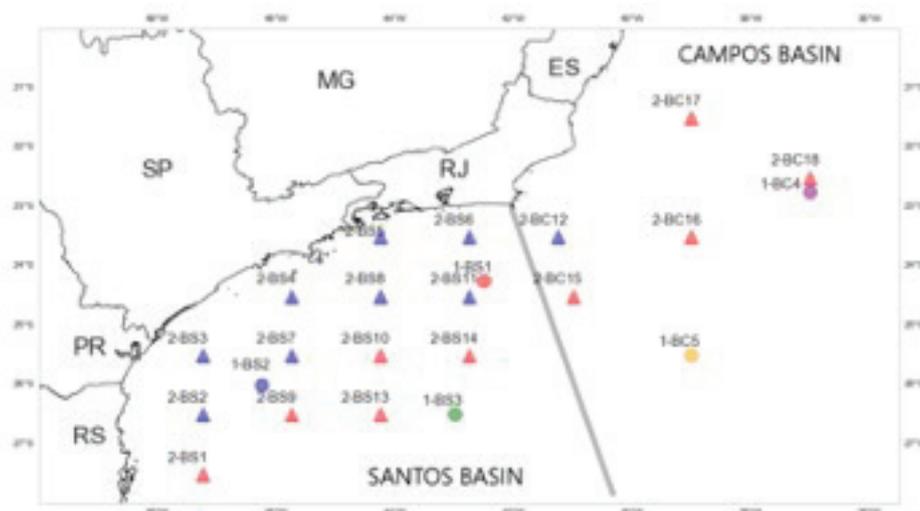


Figura 1. Localização dos pontos dos dados de Vento a 10 m (círculo) e de Hs (triângulo), onde BS e BC são abreviações de Bacia de Santos e Bacia de Campos respectivamente. Pontos de Vento a 10 m foram escolhidos através de uma análise de *cluster* gerado a partir dos dados da Reanálise ERA 5, não mostrados neste trabalho. Pontos de Hs foram escolhidos utilizando um espaçamento de 1° de latitude e longitude. Os pontos de Hs (triângulos) em vermelho são os pontos que foram possíveis calcular os níveis de retorno para todas as direções, os pontos em azul não continham o número mínimo de observações (pelo menos 1 por ano) em determinadas direções para a realização dos cálculos

Todos os cálculos dessa sessão foram realizados através da biblioteca *Thresholdmodeling*, em Python (Lemos *et. al.*, 2020). A descrição de todos os cálculos se encontra em Coles (2001) onde está disponibilizada de maneira detalhada a Modelagem Estatística de Valores Extremos.

Para a aplicação do modelo POT, deve-se determinar o limiar u e, para uma modelagem correta, é necessária a escolha de um limiar adequado; isto é, que não seja nem tão grande resultando em poucos excedentes e alta variância, e nem tão pequeno de forma a gerar *bias* na modelagem (Coles, 2001). Diante disso, são utilizados dois métodos para identificação do limiar. O primeiro método utiliza a análise do gráfico *Mean Residual Life Plot* e sua linearidade, onde é selecionado como limiar o menor valor dentro de um dado intervalo, a partir do qual o MRL tem um comportamento aproximadamente linear (Figura 2a).

Do início da curva até aproximadamente 7 é possível observar um decréscimo no valor da ordenada e comportamento côncavo, não indicando aproximar bem uma reta, a partir de 7 esse comportamento curvo perde evidência.

Apesar de muito útil, é comum ter algum tipo de dificuldade de interpretação na análise do gráfico *Mean Residual Live Plot*, comprometendo assim a escolha de u adequado. Assim sendo, um segundo método é aplicado, sendo ele complementar ao primeiro, baseado na estabilidade dos parâmetros. Neste caso, se os excessos acima de um limiar u_0 seguem uma GPD com parâmetros ξ, σ , então os excessos acima de um limiar $u > u_0$ também seguem uma GPD com mesmo parâmetro de forma .

$$\sigma_u = \sigma_{u_0} + \xi(u - u_0) \quad (1)$$

Logo para $\xi \neq 0$, o parâmetro de escala varia com u . Porém, fazendo uma reparametrização, neste caso, $\sigma(u)$ é chamado parâmetro de escala reparametrizado. Os plots de $\sigma(u)$ e $\xi(u)$ possuem uma aparente simetria. Os ICs para ξ são obtidos a partir da matriz de variância-covariância V . Os ICs para σ requerem a utilização do Método Delta. Deve-se selecionar como limiar o menor valor dentro de um dado intervalo, a partir do qual o parâmetro é aproximadamente constante e os pontos perdem o comportamento linear, passando a variar. (Figura 2b e 2c).

Desta forma, a escolha do limiar deve ser feita com auxílio dos dois métodos. No exemplo é seguro afirmar que o limiar se encontra próximo de 7.

Após a escolha do limiar adequado, os parâmetros da GPD foram calculados utilizando o estimador de Máxima Verossimilhança *Maximum Likelihood* (MLE).

Um dos principais objetivos da inferência estatística é a previsão futura. Tratando-se de eventos extremos, tal análise

é necessária, visto o impacto por eles gerado. Para se obter os níveis de retorno, foram realizados os cálculos explicados adiante.

Supondo que a distribuição GPD seja adequada para modelar as excedências e ter estimado os parâmetros σ, ξ pelo método MLE, obtemos facilmente o seguinte resultado:

$$P[X > u] = \zeta_u \quad (2)$$

Quando $\zeta_u = P[X > u]$, i.e., a probabilidade de exceder o limite. Uma estimativa empírica de ζ_u pode ser dada equação:

$$\zeta_u = \frac{N_u}{n} \quad (3)$$

Onde N_u é o número de observações que excedem o limiar u e n o número total de observações. Assumindo que n medidas X_1, X_2, \dots, X_n foram realizadas durante N anos obtendo Y_1, Y_2, \dots, Y_{N_u} observações excedentes iid, pode-se definir n_y o número de observações excedentes por ano. Para os dados, pode-se introduzir o termo “taxa de excedência média”, que é o número médio de observações acima do limiar u por ano. Logo podemos definir a variável ζ_u como,

$$\hat{\zeta}_u = \frac{N_u}{n_y} \quad (4)$$

Assim, o nível de período de retorno x_m (que é excedido em média uma vez a cada m observações) é dado por:

$$x_m = \begin{cases} \frac{u + \hat{\sigma}_u(\theta)}{\hat{\xi}(\theta)} \left[(\hat{\zeta}_u^m)^{\hat{\xi}(\theta)} - 1 \right], \xi(\theta) \neq 0, \\ u + \hat{\sigma}_u(\theta) \log(\hat{\zeta}_u^m), \xi(\theta) = 0, \end{cases} \quad (5)$$

Para o estudo de extremos é mais conveniente fornecer níveis de retorno em uma escala anual, de modo que o nível de retorno em N_y seja o nível que se espera exceder em média uma vez a cada N anos. Se há n_y observações por anos, isso corresponde ao nível de retorno de m observações, onde $m = N \times n_y$. Portanto, o nível de retorno de N_y é estimado através da equação:

$$x_N = \begin{cases} \frac{u + \hat{\sigma}_u(\theta)}{\hat{\xi}(\theta)} \left[(\hat{\zeta}_u^{N n_y})^{\hat{\xi}(\theta)} - 1 \right], \xi(\theta) \neq 0, \\ u + \hat{\sigma}_u(\theta) \log(\hat{\zeta}_u^{N n_y}), \xi(\theta) = 0, \end{cases} \quad (6)$$

Para completar a análise e gerar os gráficos de x_T , devem ser estimadas as faixas dos ICs que foram calculadas através do Método *Delta Method*. As incertezas de ζ_u também

devem ser incluídas no cálculo. Finalmente é traçada a curva do nível de retorno, em uma escala logarítmica, a fim de enfatizar o efeito da extrapolação, bem como adicionar os ICs e estimativas empíricas dos níveis de retorno (Figura 2d).

Testes de aderência

Segundo Zar (1998), para avaliar o nível de concordância de um modelo a um conjunto de dados devem-se realizar testes de aderência. Através da biblioteca *Threshold modeling*, em Python, foi possível verificar se o modelo estatístico descreve bem as observações empíricas.

Em estatística, um gráfico PP-Plot avalia a concordância de dois conjuntos de dados, no caso desse estudo, os dados empíricos e dados teóricos. Assim uma forma de interpretar tal gráfico é observar o quão distantes esses pontos estão dessa reta, quanto mais distantes, menos adequada é a distribuição proposta, logo os dados não se enquadrariam em uma GPD. Da mesma forma se avalia o gráfico QQ-Plot.

Posteriormente foi realizado o Teste de Kolmogorov-Smirnov, descrito em Campos (1983), é um método não paramétrico para testar o ajuste da distribuição aos dados, fornecendo a conclusão se a distribuição é adequada ou não.

O Teste Dvoretzky–Kiefer–Wolfowitz limita o quão próxima uma função de distribuição estará da função distribuíção. Este experimento foi utilizado para gerar limites de confiança baseados em uma função de Distribuição cumulativa (CDF), a fim de produzir uma faixa de confiança, sendo paralelas e igualmente espaçadas em torno do CDF empírico. Para os dados serem modelados por uma GPD, devem estar próximos da reta e dentro da faixa de confiança.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nessa seção são apresentados os resultados e a discussão de todas as variáveis analisadas. Após a escolha do limiar, foram realizados os testes de aderência, com a finalidade de verificar o quanto os dados podem ser representados por uma GPD. Finalmente, após todos os testes, foi possível obter os níveis de período de retorno x_N que foram estimados pelo Modelo POT para 100 anos, utilizando 99,9% de nível de significância estatística.

Vento a 10 m

Através dos testes de aderência foi possível avaliar a qualidade dos dados e se os mesmos poderiam ser representa-

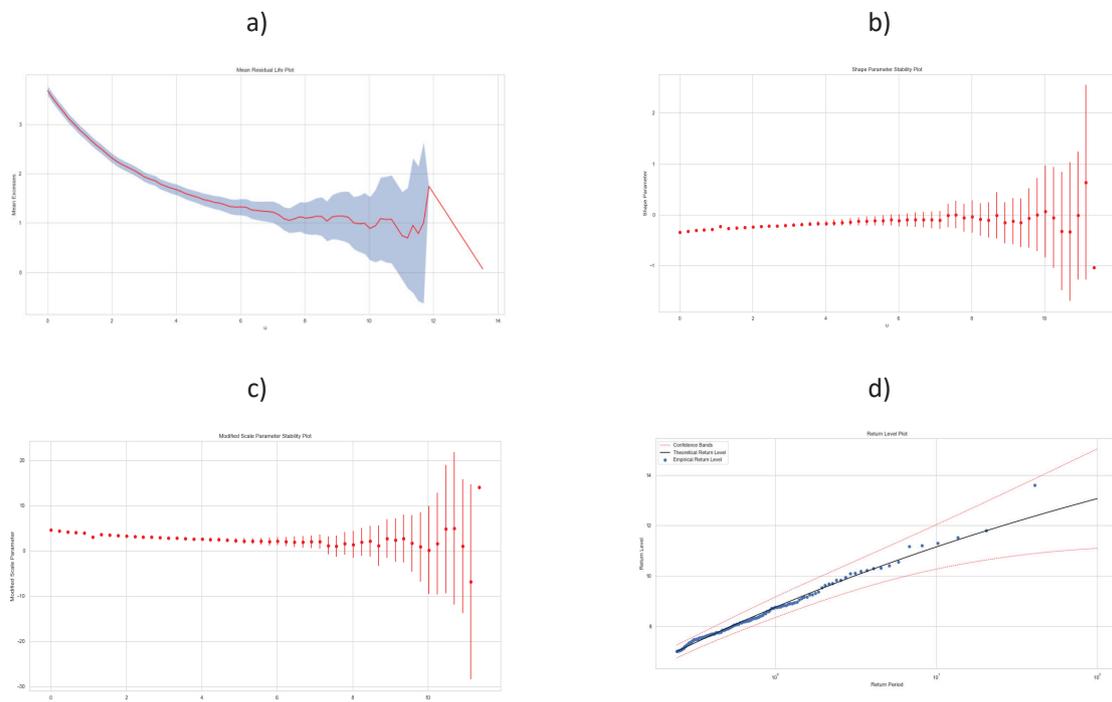


Figura 2. a) Gráfico *Mean Residual Life Plot*. Área sombreada em azul mostram os intervalos de confiança de 99,9%. b) Gráfico *Shape Parameter Stability Plot*. c) Gráfico *Modified Scale Parameter Stability Plot*. Nos dois gráficos o parâmetro de forma e escala perdem o comportamento linear em aproximadamente 7. d) Gráfico *Return Level Plot* com $u=7$. A linha sólida preta representa o nível de retorno (eixo-y) teórico de até 100 anos de período de retorno (eixo-x). Os níveis de retorno dos dados empíricos estão representados pelos pontos azuis. Linhas tracejadas vermelhas representam o intervalo de confiança ponto a ponto de 99,9%

dos por uma GPD. Apresentamos o resultado o ponto 1-BS3 e selecionando a direção SW para a realização dos testes de aderência. Analisando a Figura 3, é possível perceber a coerência entre os dados empíricos e modelo, com poucos valores distantes da reta, mas todos dentro do IC. Deste modo, fica evidente que os dados são adequados para se calcular o nível de retorno, sendo os resultados similares para as demais direções e pontos escolhidos.

Velocidade do vento a 10 m

Primeiramente, foi realizada uma análise prévia dos dados através de estatística descritiva e a construção de Rosas dos Ventos com o período de 41 anos (1979-2019).

Com base nos dados referentes à Tabela 1, tem-se que o ponto 1-BS3 apresenta em média os valores mais altos, apesar dos mesmos apresentarem-se bem próximos, por essa razão a análise direcional é mais valorosa.

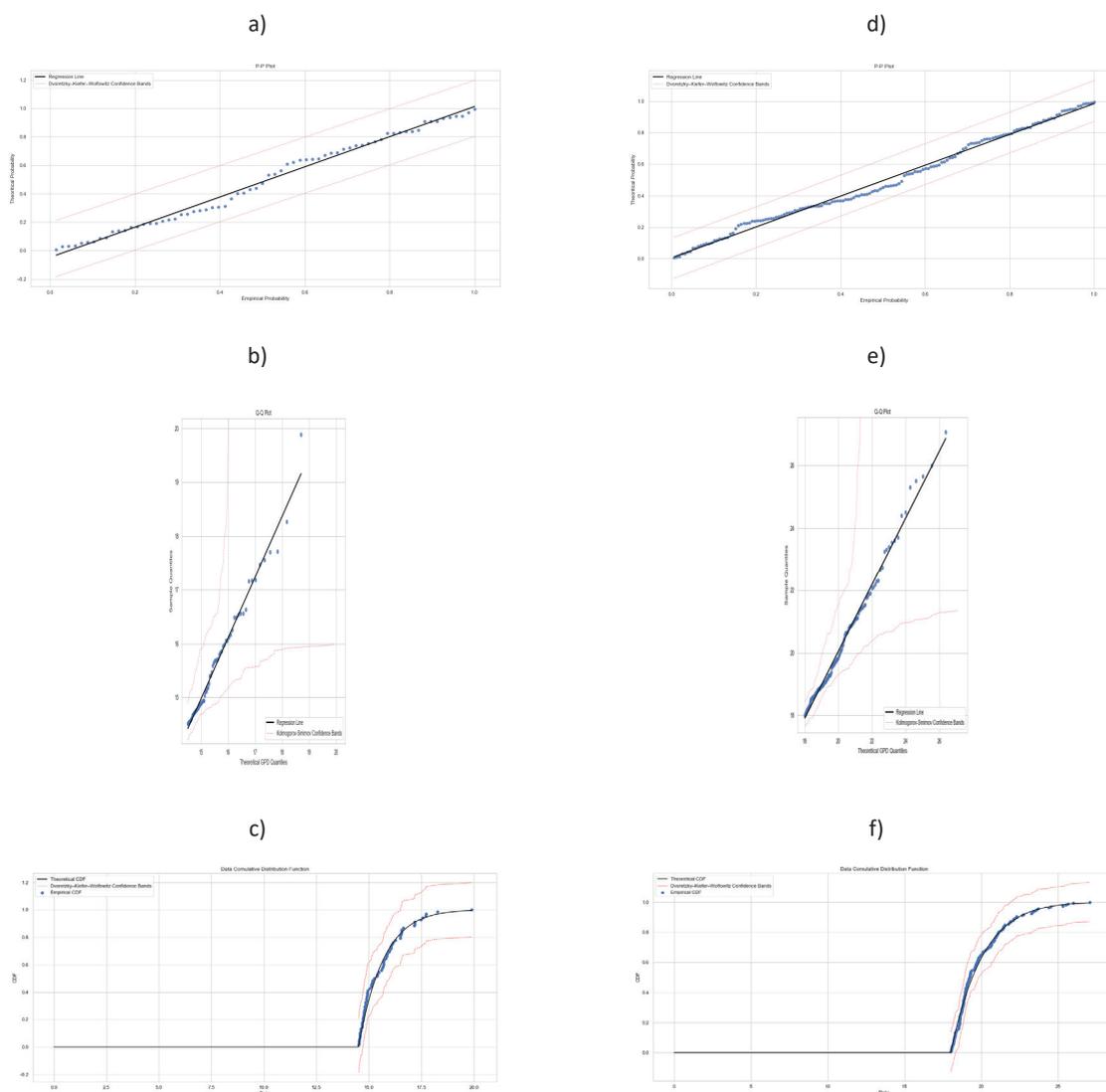


Figura 3. Testes de aderência para a modelagem da distribuição GPD para a série temporal do Ponto 1-BS3 e direção SW (a), b) e c) velocidade do vento, d), e) e f) rajada do vento). Em a) e d) é mostrado o Gráfico *PP-Plot* onde o eixo-y representa a probabilidade dos dados teóricos e o eixo-x dos dados empíricos. Linha sólida preta representa a regressão linear dos pontos e a linha tracejada vermelha representa o intervalo de confiança de 99,9% calculado a partir do Método Dvoretzky–Kiefer–Wolfowitz. Em b) e e) é mostrado o Gráfico *QQ-Plot*, onde o eixo-x representa os quantis dos dados empíricos e o eixo-y, os quantis dos dados teóricos. Linha sólida preta representa a regressão linear dos pontos, e a linha tracejada vermelha representa o intervalo de confiança de 99,9% calculado a partir do Método Kolmogorov-Smirnov. Em c) e f) são mostrados os Gráficos *Data Cumulative Distribution Function*. A linha sólida representa os dados teóricos, os pontos representam os dados empíricos e a linha tracejada vermelha é o intervalo de confiança de 99,9% calculado a partir do Método Kolmogorov-Smirnov.

Na Figura 4a observa-se que o ponto 1-BS1, possui maior ocorrência de ventos de quadrante NE, apresentando pouca ocorrência de vento em outras direções. Entretanto, a partir de uma análise dos dados, foi observado que a direção S obteve o valor máximo da velocidade do vento. No ponto 1-BS2 apesar dos ventos de NE possuírem maior frequência, há ocorrências significativas de ventos em outras direções (Figura 4b). Destacando os ventos oriundos de S e SW que geraram o valor máximo de velocidade. Os dados do ponto 1-BS3 apresentam uma predominância de ventos de NE, sendo essa uma característica dominante na região de estudo (Figura 4c). Apesar dos ventos de S e SW disporem de uma quantidade relevante de observações, em média os ventos de NE possuem maiores velocidades nesse ponto. Entretanto, as direções NW e S apresentam os maiores valores máximos.

No ponto 1-BC4 (Figura 4d), observa-se uma maior ocorrência de ventos de N e NE, sendo essa a mesma com o maior valor médio de velocidade do vento. A direção W possui a ocorrência do valor máximo da série temporal.

O ponto 1-BC5 (Figura 4e), mostra uma maior ocorrência de ventos de N e NE, sendo o maior valor médio e valor

máximo da velocidade do vento na direção N. A direção SE também apresentou altos valores máximos e médios.

Tabela 1. Estatística descritiva da variável aleatória velocidade do vento a 10 metros (m/s) do período de 41 anos (1979-2019) dos pontos da Figura 1

Pontos	Média (m/s)	Máximo (m/s)	Mínimo (m/s)	Desvio Padrão (m/s)
1-BS1	6.68	20.33	0.02	2.78
1-BS2	5.88	20.62	0.03	2.58
1-BS3	6.85	20.62	0.01	2.73
1-BC4	6.99	20.15	0.01	2.59
1-BC5	6.52	17.62	0.01	2.29

Os resultados obtidos através do Modelo POT para o cálculo dos níveis de retorno do vento a 10 m e seus respectivos IC de 99,9% podem ser observados na Tabela 2.

No ponto 1-BS1, conforme se pode observar que a direção W possui o maior valor de e a direção E com o menor valor. A partir da Escala Beaufort classificou-se os ventos

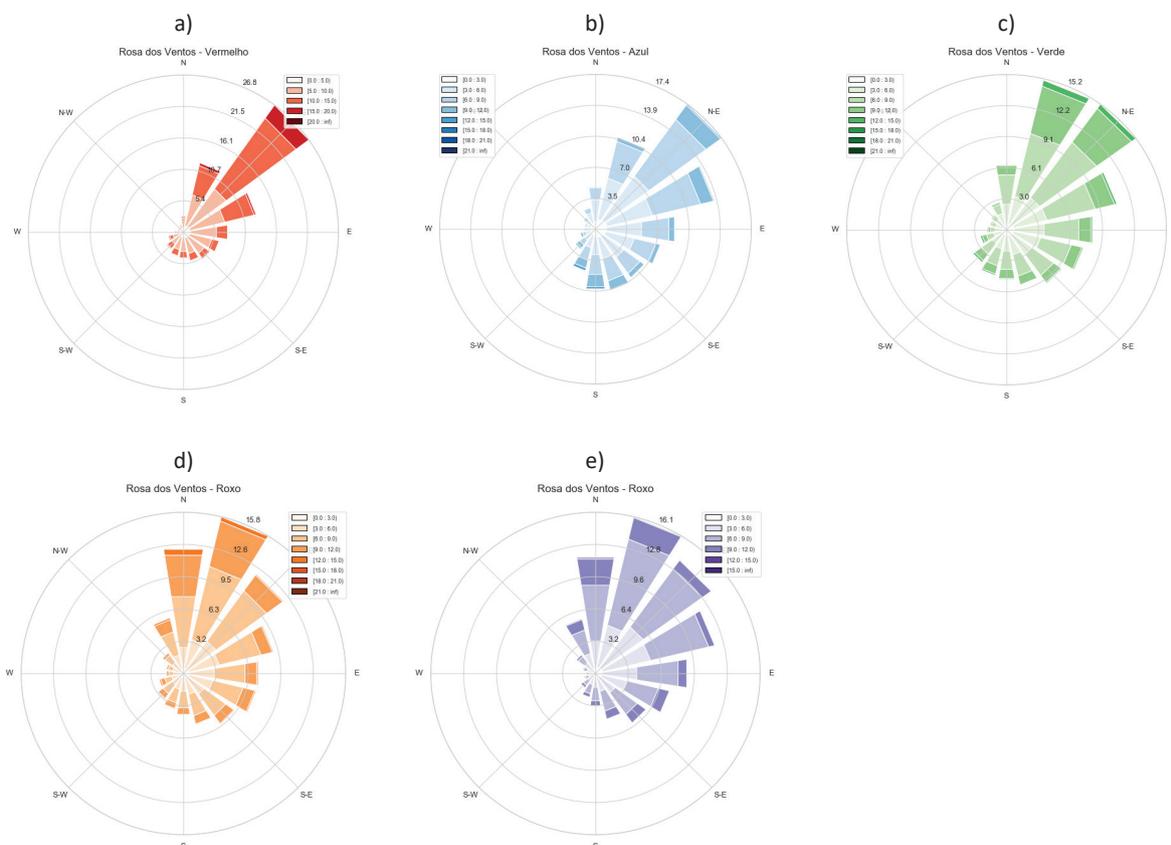


Figura 4. Rosas do Vento representando direção e velocidade do vento a 10 m durante o período de 1979-2019 nos respectivos pontos a) 1-BS1 b) 1-BS2 c) 1-BS3 d) 1-BC4 e) 1-BC5.

como Muito Forte ou força 8 as direções S e W, e as demais direções como Forte ou Força 7 (exceto direção NW que possui Força 6 ou Muito Fresco). No 1-BS2 nota-se que o mesmo possui SE com valores de x_N mais elevados e N com os valores mais baixos. A direção SW classificada como Força 11 ou Tempestuoso. As direções E, SE, S e SW podem ser classificadas como Muito Forte ou Força 8, as demais direções como Forte ou Força 7.

Já no ponto 1-BS3 apresenta os maiores valores de x_N , sendo a componente direcional S com o maior valor. Considerando o IC, a direção NW possui maior amplitude, isso ocorre pois o IC nesse ponto foi maior para NW do que para a direção S, com isso o limite superior de NW gerou valores mais elevados de nível de retorno. A direção N apresentou o valor mais baixo para o ponto 1-BS3. Classificou-se os ventos de quadrante NW e S como Duro ou Força 9, e as demais direções como Muito Forte ou força 8.

Pode-se constatar que no ponto 1-BC4 as direções N e S possuem os maiores valores e a direção NW o menor valor. Todas as direções, a partir da Escala Beaufort, foram classificadas como Muito Forte ou Força 8. O resultado do ponto 1-BC5, apresenta valores de x_N , a direção N possui maior valor e a direção W menor valor. Ventos de direção oriundas de N e NE, podem ser classificados como Muito Forte ou Força 8, as demais direções como Forte ou Força 7.

Padrões atmosféricos predominantes

A predominância dos ventos na região do Oceano Atlântico Sudoeste está relacionada a diversos fatores. Na região do Atlântico Sul, tendo maior influência da ASAS- centro de alta pressão com extensão de aproximadamente 2000 km - constitui-se a partir do ramo da célula de Hadley próximo de 30°S (Campos, 2009). A ASAS possui carácter semipermanente, contribuindo na persistência de ventos de quadrante norte e nordeste, os quais resultam em fenômenos meteorológicos na região dentro das escalas micro, meso e sinótica podendo causar instabilidade ou estabilidade de

acordo com o seu posicionamento e composição atmosférica presente.

Os ventos predominantes da ASAS podem sofrer inversão para ventos de quadrante sul quando outros fenômenos da escala sinótica atingem a região (Silva, 2013). Os sistemas atmosféricos transientes podem tornar o tempo instável, tais como: baixas, sistemas frontais, diversos tipos de ciclones, e outros sistemas oriundos da interação oceano-atmosfera que também promovem intensificação dos ventos, sendo as rajadas o fenômeno de maior potencial destrutivo, pois sua previsão exata ainda é complexa e incerta.

A incursão de um sistema transiente implica em mudanças em algumas variáveis meteorológicas, sendo as principais: pressão, vento, temperatura, umidade, cobertura de nuvens e precipitação. O vento é um importante componente diagnóstico da aproximação desses sistemas, pela mudança repentina em sua intensidade e direção. Nas regiões Sul e Sudeste do Brasil o vento em baixos níveis tem predominância nordeste, como mencionado anteriormente, em uma situação de pré-frontal pode ser observado nos meteorogramas um giro no vento que passa a ser de sudoeste e de sudeste acompanhando o avanço da frente (Vianello, 1991; Fedorova, 1999; Oliveira *et al.*, 2001).

Outro fenômeno presente na região costeira que ocasionalmente pode percorrer dezenas de quilômetros é a circulação de brisa, que se forma a partir do aquecimento diferencial entre continente e oceano, gerando gradientes de temperatura que acarretam fluxos de energia para a atmosfera, responsável na formação de gradientes de pressão que impulsionam o movimento. A brisa marítima, em condições sinóticas estáveis, aumenta a intensidade do vento, muda sua direção e transporta a umidade, podendo ser responsável por alguns eventos geradores de condições extremas na região costeira (Atkinson, 1981).

Em Silva (2013) constatou-se um núcleo de quantidade de valores acima do limiar na costa sudeste (ao redor da região de Cabo Frio-RJ), indicando ser uma área com maior

Tabela 2. Tabela Valores de Nível de Retorno de 100 anos da variável Vento a 10 m para os pontos 1-BS1, 1-BS2, 1-BS3, 1-BC4 e 1-BC5

Direção	1-BS1			1-BS2			1-BS3			1-BC4			1-BC5		
	x_N	+IC ₉	-IC ₉												
N	15.51	17.69	13.33	14.39	15.36	13.41	17.73	19.47	15.98	19.45	21.78	17.12	17.43	19.64	15.22
NE	16.55	17.79	15.31	15.67	16.70	14.63	19.25	21.82	16.67	18.35	20.78	15.91	18.30	22.47	14.14
NW	13.07	15.05	11.10	16.55	18.64	14.46	21.04	28.06	14.02	17.99	20.17	15.80	15.27	16.28	14.26
S	18.23	20.40	16.05	19.92	23.73	16.10	21.25	26.26	16.25	19.44	22.77	16.10	17.04	19.41	14.69
SE	16.21	17.94	14.47	20.63	26.35	14.92	17.75	19.14	16.36	18.24	21.38	15.11	17.03	19.50	14.57
SW	16.86	17.73	15.99	19.64	22.03	17.24	19.76	22.68	16.84	18.51	21.33	15.70	15.12	15.81	14.44
E	15.56	16.82	14.32	17.42	19.75	15.10	20.29	23.49	17.10	19.01	22.72	15.30	16.88	20.79	12.97
W	18.41	21.31	15.51	17.04	18.76	15.33	20.13	22.36	17.91	19.29	21.42	17.16	14.97	16.89	13.06

quantidade de valores acima do limiar para a direção NE. Pode-se observar esse fato através da Figura 10 em que todos os pontos desse estudo, principalmente o ponto vermelho, indicam a maior quantidade de observações oriundas de NE. Entretanto, essa não é a direção que retorna os maiores valores extremos, que também foi observado em Silva (2013), sendo os maiores níveis de retorno para a região sudeste do Brasil resultantes das direções SE, S e NW. Percebe-se que no presente estudo os valores mais altos também se encontram nessas direções, dando destaque para o ponto 1-BS3 que apresentou a direção S com o maior nível de retorno dos três pontos.

Rajada do Vento a 10 m

Com base nos dados da Tabela 3, tem-se que o ponto 1-BS3 apresentou em média os valores mais altos; entretanto, o ponto 1-BS2 apresentou o valor máximo maior. O desvio padrão e a variância obtiveram valores parecidos, sendo superiores se comparados com a velocidade do vento apresentada na seção anterior.

A Figura 5 mostra os dados representados em gráfico de Rosa dos Ventos. Como se observou na análise estatística da Velocidade do Vento a 10 m, todos os pontos indicaram maior ocorrência de ventos oriundos de NE.

A partir de uma análise dos valores máximos (Tabela 3), o ponto 1-BS1 apresentou a direção S com o maior valor, o ponto 1-BS2 apresentou a direção NE com o maior valor e o ponto 1-BS3 apresentou as direções E, SE e W com os valores máximos o que não foi observado na análise das respectivas velocidades do vento a 10 m nos três pontos.

O ponto 1-BC4 está representado na Figura 5d, onde se observa uma maior ocorrência de ventos de N e NE, possuindo os maiores valores médios. Pela análise estatística, constatou-se que o maior valor da rajada ocorreu na direção SW, o que também não ocorreu para velocidade do vento a 10 m.

Na Figura 5e nota-se que o ponto 1-BC5 possui maior quantidade de observações na direção NE e N, e valor máximo na direção S onde, mais uma vez, não foi observado na velocidade do vento a 10 m.

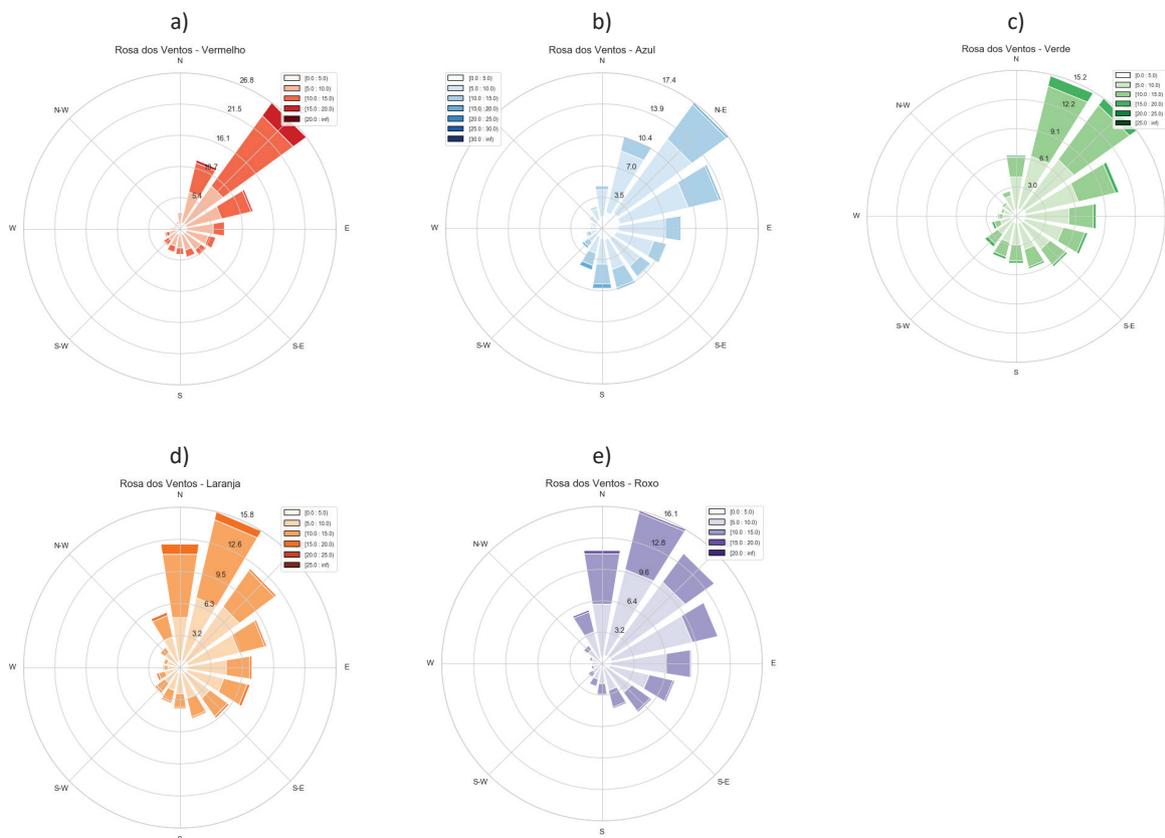


Figura 5. Rosa dos Ventos representando direção e rajada do vento a 10 m durante o período de 1979-2019 nos respectivos pontos a) 1-BS1 b) 1-BS2 c) 1-BS3 d) 1-BC4 e) 1-BC5

Tabela 3. Estatística descritiva da variável aleatória rajada do vento a 10 metros do período de 41 anos (1979-2019) (m/s) dos pontos da Figura 1

Pontos	Média (m/s)	Máximo (m/s)	Mínimo (m/s)	Desvio Padrão (m/s)
1-BS1	9.06	24.67	0.54	3.53
1-BS2	7.94	30.78	0.18	3.32
1-BS3	9.25	29.58	0.29	3.49
1-BC4	9.41	27.06	0.59	3.27
1-BC5	8.85	24.66	0.92	2.84

Os valores de níveis de retorno e seus respectivos IC de 99,9% podem ser observados na Tabela 4.

Observa-se no ponto 1-BS1 que a direção W possui o maior valor de x_N e a direção NW com o menor valor. A partir da Escala Beaufort classifica-se os ventos como Duro ou Força 9 em todas as direções exceto NW como Muito Forte ou Força 8.

A partir do resultado do ponto 1-BS2 nota-se que ele possui SW com valores de x_N mais elevados e N com os valores mais baixos. As direções S e SW classificadas como Tempestuoso ou Força 11, a direção W como Muito Duro ou Força 10, as demais direções como Duro ou Força 9.

No ponto 1-BS3 apresenta em média os valores de x_N mais elevados, sendo a direção E com o maior valor. A direção NE apresentou o valor mais baixo. Classifica-se os ventos de quadrante E e W como Tempestuoso ou Força 11, as direções N, NW, S, SE e SW como Muito Duro ou Força 10 e a direção NE como Duro ou Força 9.

Para a Baía de Campos foram utilizados os pontos 1-BS4 e 1-BC5. No ponto 1-BS5 apresenta a direção S com x_N mais elevado e a direção E com o menor valor. Classificam-se os ventos de quadrante S como Tempestuoso ou Força 11, as direções NW, N, SW e W como Muito Duro ou Força 10 e as direções E e SE como Duro ou Força 9. No ponto 1-BC4 a

direção SE possui o maior valor de x_N e a direção SW o menor valor. A direção SW como Muito Forte ou Força 8, e as demais direções como Duro ou Força 9.

O trabalho de Liska *et al.* (2013a) teve como objetivo estimar os níveis máximos de velocidade de ventos do município de Piracicaba-SP e comparar o resultado de duas metodologias: Blocos Máximos e a POT. Os resultados mostraram que a POT foi mais precisa, uma vez que apresentou menores valores do erro padrão relativo. No período estudado, o maior nível de retorno estimado foi de 29,39 m/s para 100 anos, que é considerado, a partir da Escala Beaufort, como Tempestuoso ou Força 11.

No estudo de Sant’Anna (2018) são apresentados os procedimentos para a estimativa de ventos extremos, atualmente, utilizados na França. Para se obter os valores de nível de retorno para 50 anos, foi utilizado o modelo estatístico POT e a base de dados de velocidade da rajada do vento do estado do Rio de Janeiro. Percebe-se que no presente estudo os valores também se encontram entre 20 e 30 m/s, sendo o valor mais alto de 29,81 m/s no ponto 1-BC4. Se considerar o IC, o nível de retorno chega a 38,64 m/s, no mesmo ponto, para a direção S.

Altura Significativa das Ondas

A Figura 6 dispõe os gráficos dos testes de aderência dos dados ao modelo. Foi escolhido o ponto 2-BS14 e selecionada as direções SW e W. É possível perceber a coerência do modelo em representar os dados empíricos, pois os valores se encontram próximos da reta e dentro do IC. Conclui-se que o modelo e os dados de Hs podem ser representados por uma GPD, por conseguinte se calcular o nível de retorno.

Com base nos dados referentes a Tabela 5, tem-se que o ponto 2-BS13 apresenta em média 2.01 m de Hs e valor máximo de 7.08 m, sendo o mesmo oriundo de SW. No ponto 2-BC15 observa-se o valor máximo de 6.02 m de SW.

Tabela 4: Tabela Valores de Nível de Retorno de 100 anos da variável Rajada do Vento a 10 m para os pontos 1-BS1, 1-BS2, 1-BS3, 1-BC4 e 1-BC5.

Direção	1-BS1			1-BS2			1-BS3			1-BC4			1-BC5		
	x_N	$+IC_9$	$-IC_9$												
N	22.24	25.00	19.52	21.29	23.42	19.16	25.61	29.38	21.85	27.93	31.48	24.39	23.10	26.05	20.16
NE	22.44	23.41	21.46	22.82	25.04	20.59	24.55	26.49	22.60	26.46	30.30	22.62	23.12	27.17	19.07
NW	18.00	20.15	15.65	21.54	24.83	18.24	25.50	28.84	22.16	25.34	29.63	21.04	21.51	23.34	19.68
S	25.46	33.54	17.39	28.24	34.14	22.33	28.44	33.36	23.51	29.81	38.64	20.98	23.86	28.33	19.39
SE	22.06	24.50	19.63	27.80	34.12	21.49	26.54	30.41	22.67	24.47	28.41	20.52	23.89	28.45	19.33
SW	23.45	24.91	22.00	29.56	37.06	22.06	28.01	32.09	23.93	26.69	30.17	23.21	20.27	21.27	19.26
E	21.53	23.46	19.61	23.70	26.33	21.08	29.32	34.17	24.47	24.36	27.21	21.50	23.25	28.17	18.33
W	26.79	30.90	22.49	25.42	28.67	22.17	29.07	32.37	25.76	26.52	29.62	23.43	21.72	26.15	17.29

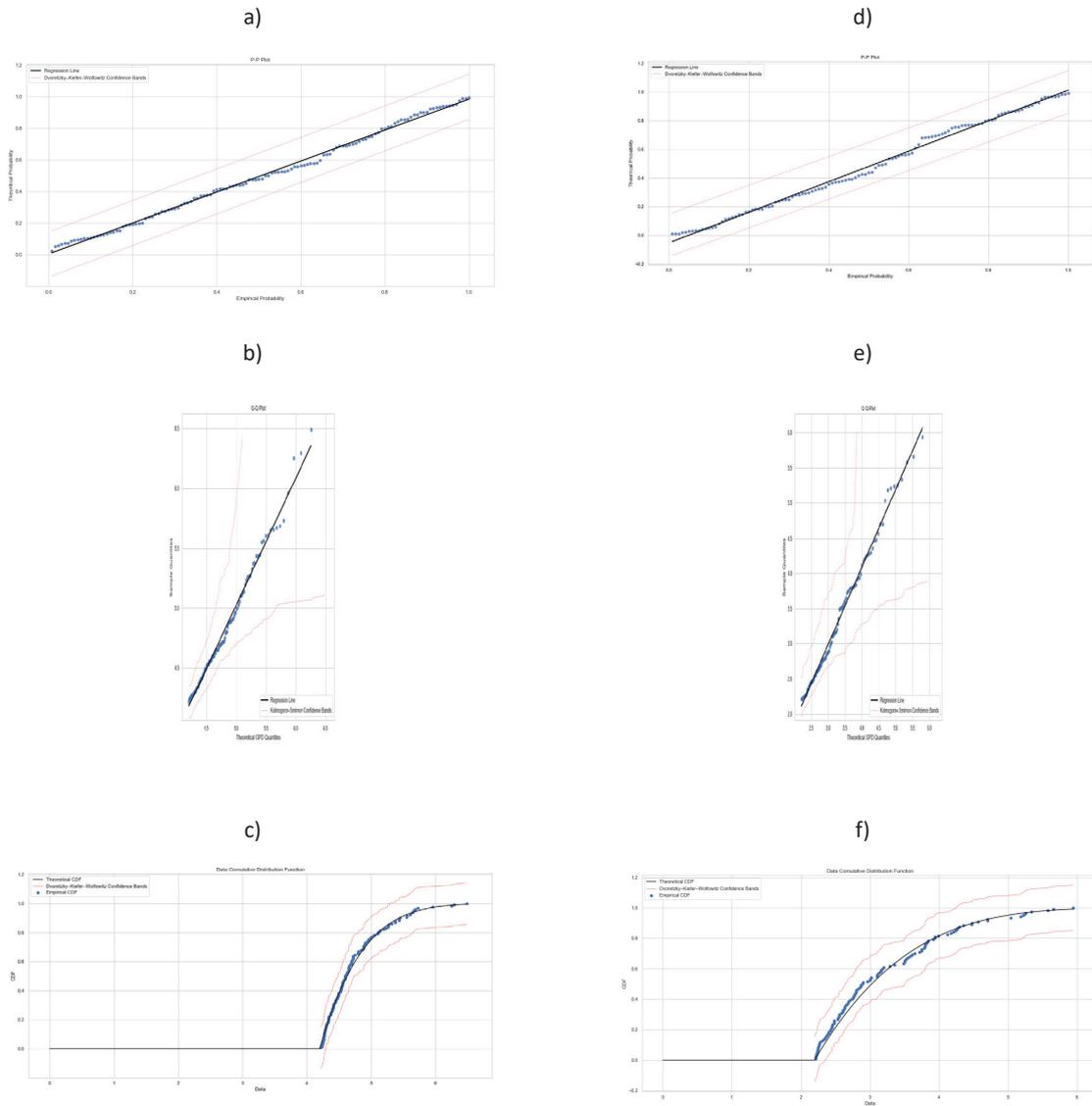


Figura 6. Figura expõe os testes de aderência para a modelagem da distribuição GPD para a série temporal da variável Hs do Ponto 2-BS14 e direção SW (a, b) e c)), direção W (a, b) e c)). Em a) e d) é mostrado o Gráfico *PP-Plot* onde o eixo-y representa a probabilidade dos dados teóricos e o eixo-x dos dados empíricos. Linha sólida preta representa a regressão linear dos pontos, e a linha tracejada vermelha representa o intervalo de confiança de 99,9% calculado a partir do Método Dvoretzky–Kiefer–Wolfowitz. Em b) e e) é mostrado o Gráfico *QQ-Plot*, onde o eixo-x representa os quantis dos dados empíricos e o eixo-y, os quantis dos dados teóricos. Linha sólida preta representa a regressão linear dos pontos, e a linha tracejada vermelha representa o intervalo de confiança de 99,9% calculado a partir do Método Kolmogorov-Smirnov. Em c) e f) são mostrados os Gráficos *Data Cumulative Distribution Function*. A linha sólida representa os dados teóricos, os pontos representam os dados empíricos e a linha tracejada vermelha é o intervalo de confiança de 99,9% calculado a partir do Método Kolmogorov-Smirnov.

Tabela 5. Estatística descritiva da variável aleatória Hs (m).

Ponto	Média (m/s)	Máximo (m/s)	Mínimo (m/s)	Desvio Padrão (m/s)
2-BS1	1.89	7.13	0.61	0.65
2-BS2	1.77	6.89	0.60	0.59
2-BS3	1.61	5.63	0.54	0.51
2-BS4	1.65	5.47	0.57	0.52
2-BS5	1.56	4.94	0.51	0.50
2-BS6	1.78	5.46	0.66	0.53
2-BS7	1.82	6.45	0.65	0.59
2-BS8	1.84	5.96	0.68	0.57
2-BS9	1.93	7.03	0.65	0.64
2-BS10	6.38	6.38	0.70	0.61
2-BS11	1.96	6.08	0.73	0.57
2-BC12	1.96	5.62	0.72	0.53
2-BS13	2.01	7.08	0.69	0.64
2-BS14	2.03	6.49	0.76	0.60
2-BC15	2.03	6.02	0.78	0.57
2-BC16	1.99	5.87	0.82	0.55
2-BC17	1.87	5.01	0.80	0.50
2-BC18	1.93	5.38	0.77	0.54

Nota-se pelas Figuras 7a e 7b que as direções S, SE, E e NE possuem maior quantidade de observações.

A Figura 8 mostra um mapa onde foi gerado para cada ponto a sua respectiva Rosa dos Ventos. A partir dela, pode-se melhor visualizar os dados e concluir que a região possui maior ocorrência de ondas proveniente das direções NE, E SE, S e SW.

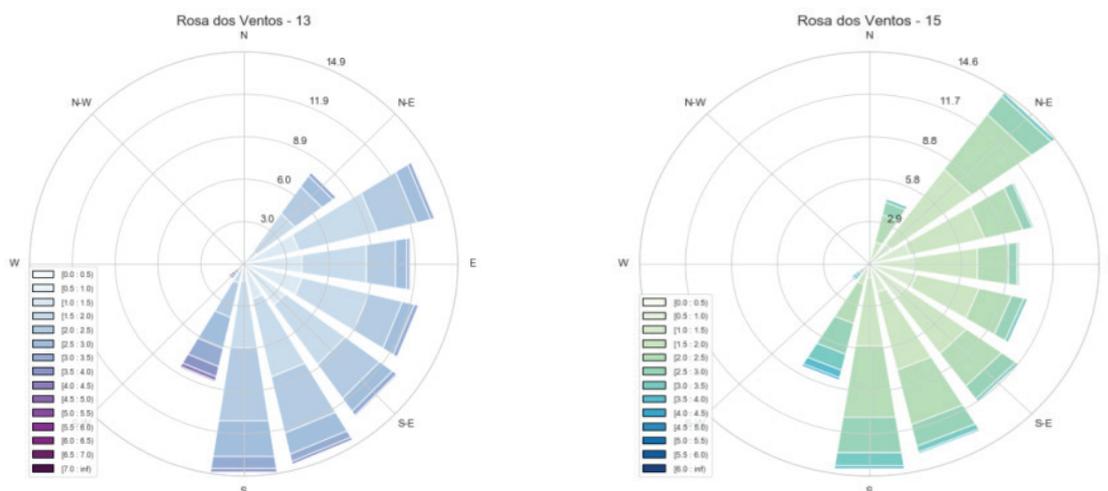
Os resultados obtidos através do Modelo POT para o cálculo dos níveis de retorno da variável Hs e seus respectivos IC de 99,9% podem ser observados nas Tabelas 6 a 9. São apresentados em forma de gráficos (Apêndice) e tabelas.

O ponto 2-BS13 apresenta, em média, os maiores valores de , sendo o maior valor pertencente à direção SW nesse ponto. O ponto 2-BS4 apresenta em média os menores valores de , sendo a direção N o menor valor.

Parente (1999) estudou os sistemas meteorológicos e os relacionou com a condição do mar na Baía de Campos, definindo quatro principais categorias: Bom Tempo, Bom Tempo com marulhos, Mau Tempo - tempestade de sudoeste e Mau Tempo - tempestade de sudeste.

As situações de Bom Tempo caracterizam-se pela dominância da ASAS onde o vento é predominante de NE. Desse modo, produz um mar local na mesma direção dos ventos (Figura 9a). Entretanto, em situações de ASAS localmente também pode ocorrer marulhos advindos de altas latitudes, caracterizando a condição do mar como Bom Tempo com marulhos (Figura 9b). Os sistemas frontais (frentes com ciclones extratropicais associados) quando se deslocam próximo à zona costeira do Sudeste do Brasil são responsáveis pela condição oceânica mais severa, gerando as maiores Hs advindas de sudoeste e sul, caracterizando condição do mar de Mau Tempo – tempestade de sudoeste.

Os anticiclones extratropicais ou polares (altas da retaguarda das frentes frias) podem intensificar os ventos de sudeste, principalmente quando o deslocamento do ciclone extratropical diminui ou por vezes estaciona, fazendo com



a)

b)

Figura 7. a) Rosas dos Ventos representando direção Hs. a) no ponto 2-BS13 e b) no ponto 2-BC15 durante o período de 1979-2019.

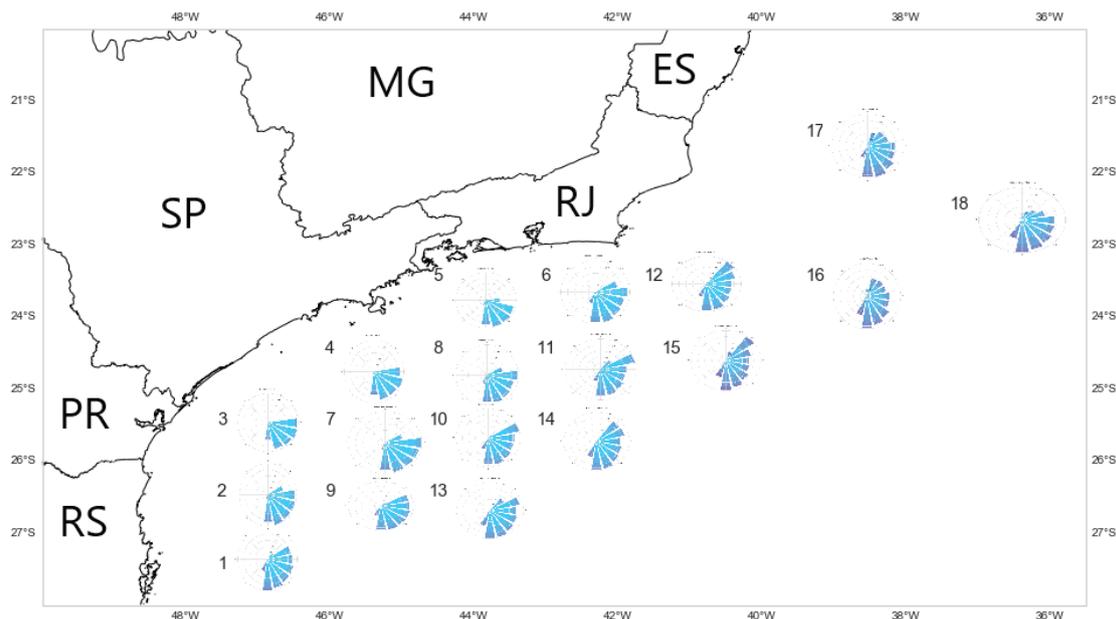


Figura 8. Localização no mapa dos pontos de Hs e sua respectiva Rosa dos Ventos para o período de 1979-2019.

Tabela 6. Valores de Nível de Retorno de 100 anos da variável Altura Significativa das Ondas para os pontos 2-BS1, 2-BS2, 2-BS3, 2-BS4 e 2-BS5

Direção	2-BS1			2-BS2			2-BS3			2-BS4			2-BS5		
	x_N	$+IC_9$	$-IC_9$												
N	3.48	3.83	3.13	3.58	3.77	3.38	3.07	3.40	2.75	2.38	2.54	2.22	-	-	-
NE	4.67	5.14	4.21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NW	3.80	4.26	3.35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S	7.39	8.24	6.54	6.51	7.34	5.67	5.55	6.40	4.70	5.50	6.19	4.82	5.15	5.93	4.37
SE	6.49	8.08	4.90	5.30	5.72	4.87	4.89	5.53	4.24	4.14	4.34	3.93	4.02	4.20	3.84
SW	7.75	8.85	6.66	5.73	6.15	5.32	4.89	5.53	4.24	5.17	5.71	4.64	4.88	5.17	4.60
E	5.51	6.32	4.69	4.88	5.45	4.32	4.33	4.80	3.86	4.11	4.40	3.82	3.60	3.84	3.37
W	3.86	4.24	3.47	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabela 7. Valores de Nível de Retorno de 100 anos da variável Altura Significativa das Ondas para os pontos 2-BS6, 2-BS7, 2-BS8, 2-BS9 e 2-BS10

Direção	2-BS6			2-BS7			2-BS8			2-BS9			2-BS10		
	x_N	$+IC_9$	$-IC_9$	x_N	$+IC_9$	$-IC_9$									
N	3.17	3.35	2.99	4.06	4.36	3.76	3.66	3.82	3.53	3.39	3.71	3.00	3.21	3.47	2.97
NE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.48	4.82	4.14	4.37	4.60	4.14
NW	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.63	6.00	3.27	4.10	5.07	3.14
S	5.01	5.42	4.60	6.53	7.65	5.40	5.73	6.59	4.89	6.38	6.84	5.90	5.78	6.23	5.33
SE	4.26	4.44	4.08	4.93	5.30	4.55	4.53	4.75	4.32	5.73	6.20	5.27	4.82	5.06	4.57
SW	5.47	5.75	5.19	6.46	7.24	5.66	6.03	6.55	5.51	7.20	7.76	6.64	6.58	7.06	6.10
E	4.68	5.68	3.67	4.56	4.92	4.20	4.60	5.00	4.21	5.43	6.09	4.77	5.04	5.60	4.48
W	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.88	7.13	4.63	5.72	6.72	4.71

Tabela 8. Valores de Nível de Retorno de 100 anos da variável Altura Significativa das Ondas para os pontos 2-BS11, 2-BC12, 2-BS13, 2-BS14 e 2-BC15

Direção	2-BS11			2-BC12			2-BS13			2-BS14			2-BC15		
	x_N	$+IC_9$	$-IC_9$												
N	4.33	4.75	3.92	4.29	4.85	3.73	5.14	4.86	3.42	3.85	4.33	3.37	4.48	5.03	3.94
NE	-	-	-	-	-	-	5.49	6.91	4.08	4.94	4.81	4.06	4.59	5.17	4.01
NW	-	-	-	-	-	-	5.05	6.12	3.98	3.92	4.46	3.37	3.41	3.61	3.22
S	5.51	6.05	4.96	5.19	5.56	4.82	6.89	7.96	5.82	6.03	6.56	5.50	5.78	6.26	5.29
SE	4.81	5.20	4.42	4.50	4.76	4.26	5.71	6.16	5.26	4.97	5.22	4.71	4.72	4.96	4.47
SW	6.06	6.43	5.69	5.82	6.37	5.27	7.77	8.97	6.56	6.57	7.07	6.07	6.25	6.89	5.62
E	4.51	5.00	4.03	4.76	5.28	4.25	5.97	7.11	4.83	5.08	5.64	4.53	4.91	5.54	4.28
W	5.17	5.80	4.54	4.34	5.37	3.31	6.63	7.44	5.83	6.26	7.15	5.38	6.28	7.64	4.91

Tabela 9. Valores de Nível de Retorno de 100 anos da variável Altura Significativa das Ondas para os pontos 2-BS11, 2-BC16, 2-BC17 e 2-BC18

Direção	2-BC16			2-BC17			2-BC18		
	x_N	$+IC_9$	$-IC_9$	x_N	$+IC_9$	$-IC_9$	x_N	$+IC_9$	$-IC_9$
N	4.56	4.97	4.15	3.82	4.12	3.52	3.82	4.12	3.52
NE	4.39	5.00	3.79	4.64	5.95	3.34	4.64	5.95	3.34
NW	4.21	4.73	3.69	3.82	4.41	3.23	3.82	4.41	3.23
S	5.81	6.85	4.78	5.07	5.50	4.64	5.07	5.50	4.64
SE	4.83	5.18	4.47	5.72	7.28	4.14	5.72	7.28	4.14
SW	5.91	6.57	5.25	5.17	5.68	4.65	5.17	5.68	4.65
E	5.03	5.95	4.10	4.35	5.03	3.67	4.35	5.03	3.67
W	4.34	4.80	3.88	3.73	4.26	3.20	3.73	4.26	3.20

que o anticiclone domine a circulação, caracterizando a condição do mar como Mau Tempo – tempestade de sudeste. Essa configuração (Figura 9c) gera pista, intensidade e a persistência dos ventos favoráveis para formação de marulhos que podem eventualmente se propagar até a região costeira do Sudeste do Brasil (Figura 9d), e provocar fenômenos de ressaca com ondas de sudeste. Isso foi detectado por Innocentini e Caetano Neto (1996) onde as ondulações elevadas causaram grandes prejuízos e pelo menos uma morte noticiada pela mídia no ano de 1988. Configuração similar mais recente, na qual as ondulações conseguiram adentrar a Baía de Guanabara em 2019, a Hs foi de aproximadamente 3.5 m. (Mazzaro *et al.*, 2019) [Figura 9c e 9d].

Campos (2009) utilizou as medições de um ondógrafo localizado na Baía de Campos, entre 1991 a 1995, e vinte anos de simulação do modelo WAVEWATCH III entre 1986 a 2005, forçado com ventos da Reanálise NCEP/NCAR para caracterizar a região. Como resultado, ele obteve através dos dados do ondógrafo, que as maiores ondulações foram as oriundas de SW com Hs de 9,54 m porém, com grande incerteza devido a curta duração da série temporal. A POT aplicada para os da-

dos do WAVEWATCH III mostrou que as maiores ondulações foram as causadas por ciclones, resultando em nível de retorno de 100 anos com Hs em torno de 7,884 m.

Entretanto, nos resultados encontrados aqui, analisando as ondas na Baía de Santos e Campos, constatou-se que as maiores ondulações foram oriundas de SW na maioria dos pontos, com exceção dos pontos 2-BS2, 2-BS3, 2-BS4, 2-BS5 e 2-BS7 por estarem mais próximos à costa. Apesar disso, apresentam os maiores valores na direção S. Vale ressaltar que esses resultados estão de acordo com a metodologia apresentada por Parente (1999).

5. CONCLUSÕES

Primeiramente, foram realizados testes de aderência, nos quais os resultados mostraram que o conjunto de dados de vento e onda da reanálise ERA5 possuem uma coerência adequada com o modelo POT. Com base nessa constatação, foi possível utilizá-lo para o cálculo do nível de retorno de 100 anos das variáveis estudadas.

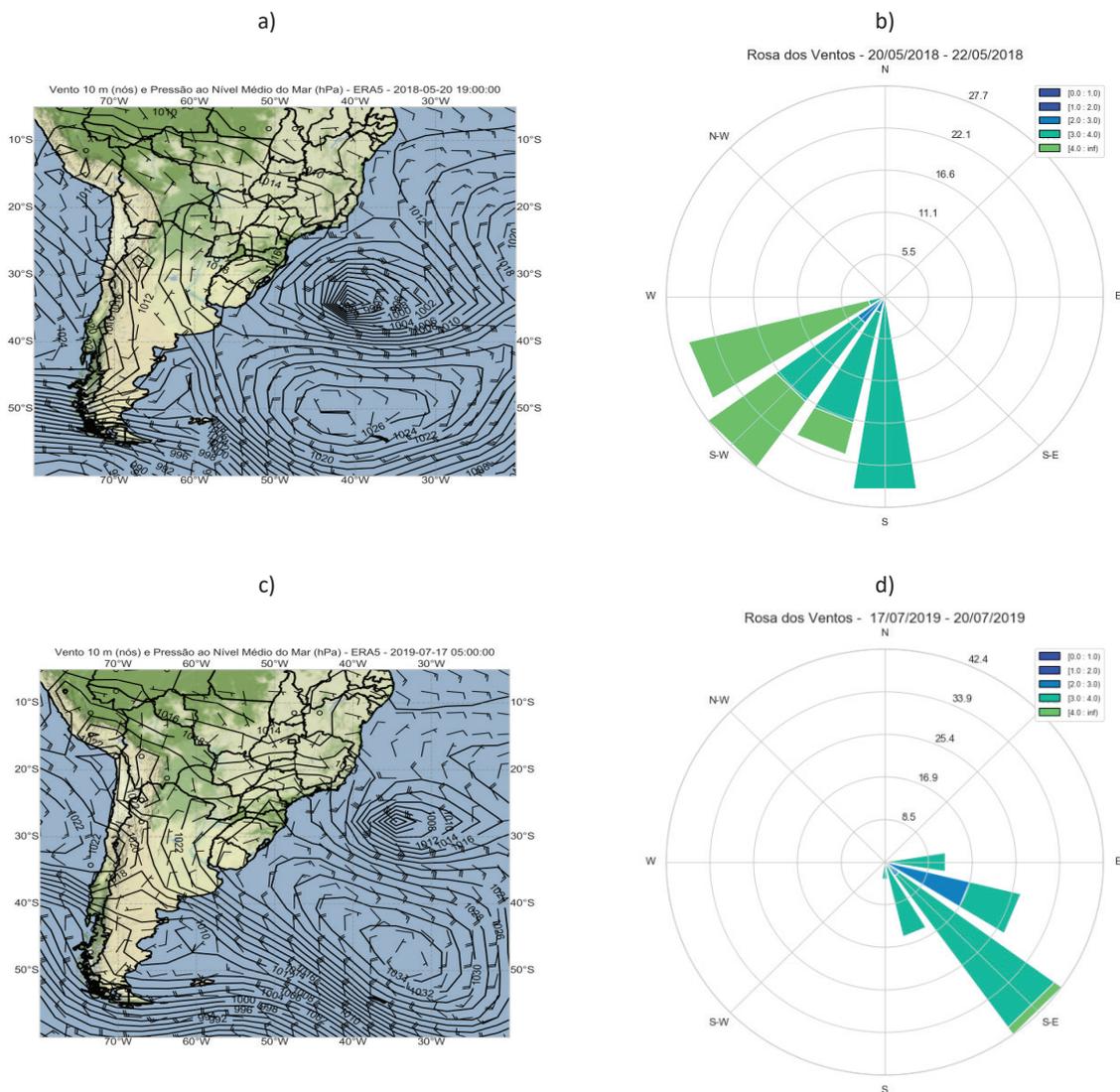


Figura 9. a) Vento a 10 m (nós) e Pressão ao Nível do Mar (hPa) – ERA5 do dia 20/05/2018 às 19z. b) Rosa dos Ventos representando Hs e Direção Média das Ondas no ponto 2-BS10 do dia 20/05/2018 ao dia 22/05/2018. c) Vento a 10m (nós) e Pressão ao Nível do Mar (hPa) – ERA5 do dia 17/07/2019 às 05z. d) Rosa dos Ventos representando Hs e Direção Média das Ondas no ponto 2-BS10 do dia 17/07/2019 ao dia 20/07/2019.

Como a técnica aplicada necessita de grande interatividade com o usuário, através da escolha dos limiares, com base na análise dos inúmeros gráficos, os resultados passam a ser mais precisos e menos suscetíveis a erros. Em alguns pontos, o extremo de onda não foi possível ser calculado para determinadas direções, por não possuírem dados suficientes para o cálculo.

Através do Modelo POT foi possível concluir que o ponto 1-BS3 gerou o maior valor de velocidade do vento de todos os pontos, na direção S com valor de 21,25 m/s, considerando um 26,26 m/s. O ponto 1-BC4 gerou o maior em relação à rajada, com valores de 29,81 m/s e 38,64 m/s.

Analisando a estatística dos dados dos pontos de Vento a 10 m, através do Gráfico de Rosa dos Ventos é possível afirmar que todos os pontos possuem maior ocorrência de ventos de

NE, relacionados à atividade da ASAS na região. A análise estatística levou a concluir que os pontos 1-BS1 e 1-BS3 possuem maiores valores em média de velocidade e rajada do vento a 10 m na direção NE. Os pontos 1-BC4 e 1-BC5 na direção N, e somente o ponto 1-BS2 possuem, em média, a direção S com os maiores valores. Isso provavelmente ocorre em razão do ponto 1-BS2 sofrer maior influência da barreira geográfica, por ser mais próximo do continente, e consequentemente ter menor ocorrência de ventos oriundos da ASAS se comparado com os outros pontos. O fato de a direção S ter em média o maior valor está relacionado com o fato da região ser influenciada pela passagem de sistemas frontais, que eventualmente se deslocam para leste, não chegando a latitudes mais baixas.

É possível concluir que a partir da estatística dos dados dos pontos 13 e 15 de Hs, as maiores ondulações que atin-

gem a BC e a BS são aquelas oriundas de SW, geradas por sistemas frontais, ocorrendo em situações de Mau Tempo, como foi apurado por Parente (1999). Valendo ressaltar que essa configuração de SW ocorre devido a contribuição das massas polares da retaguarda (sistema de alta pressão) associada aos ciclones, que aumentam o gradiente de pressão, a pista e a persistência dos ventos. Pela análise estatística, os maiores valores médios nos dois pontos também são oriundos de SW. O maior valor de foi encontrado no ponto 13 na direção SW com Hs de 7,77 m e considerando o 8,97 m.

Tendo em vista a importância deste tema, a metodologia utilizada é eficaz para avaliar valores extremos na região. Vale ressaltar que, apesar dos dados coletados *in situ* serem preferíveis ao se realizar um estudo, o uso da Reanálise ERA5 é uma alternativa a sua utilização em locais que não possuem uma série temporal suficientemente longa e consistente.

REFERÊNCIAS

- Abild, J., Mortensen, N. G. & Landberg, L. (1992), *Application of the Wind Atlas method to extreme wind speed data*. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., pp. 41–44, pp. 473–484.
- Andersson E, Thepaut JN. (2008), *ECMWF's 4D-Var data assimilation system – the genesis and ten years in operations*. ECMWF Newsletter Vol. 115, pp. 8–12.
- ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás e Biocombustível, disponível em <http://www.anp.gov.br/>, acesso em 27 abr. 2020.
- ANA – Agência Nacional de Águas. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/>, acesso em: 27 abr. 2020.
- Atkinson, B.W. *Meso-scale atmospheric circulations*. London, Academic Press, 1981. 495p., Chap. 5 e 6.
- Babanin, A.V.; Rogers, W.E.; Camargo, R. de.; Doble, M.; Durrant, T.; Filchuk, K.; Ewans, K.; Hemer, M.; Janssen, T.; Kelly-Gerrey, B.; Machutcheon, K.; McComb, P.; Qiao, F.; Schulz, E.; Skvortsov, A.; Thomson, J.; Vichi, M.; Violante-Carvalho, N.; Wang, D.; Waseda, T.; Williams, G. and Young, I.R. (2019), *Waves and Swells in High Wind and Extreme Fetches, Measurements in the Southern Ocean*. *Front. Mar. Sci.* Vol. 6, p. 361.
- Bjerknes, J. (1919), *On the structure of moving cyclones*. Geofysiske Publikasjoner, Vol. 1, No. 2, p. 1-8.
- Campos, R. M. (2009), *Análise dos Extremos de Onda no Rio de Janeiro Associados a Ciclones Extratropicais no Atlântico Sul*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Engenharia Oceânica. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Candella, R. (1997), *Estudo de Alguns Casos Significativos de Ondas do Atlântico Sul através de Modelagem Numérica*. Tese de Mestrado, PEnO/COPPE/U FRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Candella, R. N.; Souza, S. M. L. (2013), *Ondas oceânicas extremas na costa sul-sudeste brasileira geradas por ciclone com trajetória anormal em maio de 2011*. *Revista Brasileira de Meteorologia*, Vol.28, No. 4, pp. 441-456.
- Coles, S. (2001), *An introduction to statistical modeling of extremes values*, Springer.
- Dee, D.P. et al., 2011. *The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system*. *Royal Meteorological Society* Vol. 137, pp. 553-597.
- Dias Pinto, J. R.; R. P. da Rocha. (2011), *The energy cycle and structural evolution of cyclones over southeastern South America in three case studies*. *Journal of Geophys. Res.:* Atmospheres, Vol. 116(D14).
- DHN – Diretoria de Hidrografia e Navegação. Centro de Hidrografia da Marinha. Manual do Observador Meteorológico, disponível em: <https://www.marinha.mil.br/chm/sites/www.marinha.mil.br/chm/files/u1907/manual-observador-completo.pdf>, acesso em: 30 abr. 2020.
- Embrechts, P.; Klüppelberg, C.; Mikosch, T. (1997), *Modeling Extremal Events*. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, (Stochastic Modelling and Applied Probability, v. 33), disponível em: <http://www.springerlink.com/index/10.1007/978-3-642-33483-2>
- Fedorova, N. (1999), *Meteorologia sinótica*, Vol. 1, Pelotas, UFPEL.
- Gan, M. A. (2009), *Ciclone Catarina: análise sinótica*, in *III SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE CLIMATOLOGIA*, Canela - RS, 18 a 21 de outubro de 2009.
- Godoi, V.A. (2011), *Avaliação de Eventos Extremos de Ondas na Baía de Guanabara*. Dissertação de Mestrado da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- Gomes, Tiago Francisco Pinheiro. (2018), *Eventos Extremos E Estruturas Coerentes Na Turbulência: Estudo De Caso Para O Vento Solar*.
- Gozzo, L. F.; Rocha, R. P. da.; Reboita, M. S. e Sugahara, S. (2014), *Subtropical Cyclones over the Southwestern South Atlantic: Climatological Aspects and Case Study*. *J. Climate*, Vol. 27, pp. 8543–8562.
- Hersbach, Hans et al. (2019). *Global reanalysis: goodbye ERA-Interim, hello ERA5*. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF).
- Holton, J. R. (1992), *An introduction to dynamic meteorology*. 3a ed, Elsevier Academic Press, New York.
- Hosking, J. R. M.; Wallis, J. R. (1987). *Parameter and quantile methods to calculate extreme wind speeds 131 tile estimation for the generalized Pareto distribution*, *Technometrics*, Vol. 29, pp. 339–349.
- Hoskins, B. J.; K. I. Hodges. (2005), *A New Perspective on Southern Hemisphere Storm Tracks*. *J. Climate*, Vol. 18, pp. 4108–4129.
- Innocentini, V.; Caetano Neto, E. S. (1996), *“A case study of the 9 August 1998 South Atlantic storm: Numerical simulations of the wave activity”*. *Wea. Forecasting.*, Vol. 11, pp. 78-88.
- Liska, G. R. et al. (2013a), *Níveis de retorno de rajadas de vento via metodologias POT e blocos máximos no município de Piracicaba-SP*. *Matemática e Estatística em Foco*, Vol. 1, No. 2.

- Liska, G.R.; Bortolini, J.; Sáfadi, T.; Beijo, A. (2013b), Estimativas de velocidade máxima de vento em Piracicaba-SP via séries temporais e Teoria de Valores Extremos. *Revista Brasileira de Biometria*, Vol. 2, pp. 295-309.
- Marengo, J.; Cornejo, A.; Satyamurty, P.; Nobre, C.A.; Sea, W. (1997), Cold surges in tropical and extratropical South America: The strong event in June 1994. *Monthly Weather Review*, Vol. 125, No.11, pp. 2759-2786.
- Mazzaro, E.; Antonio, C.F.J.L.; Rangel, R.H.O.; Palmeira, R.M.J.; Palmeira, A.C.P.A. (2019), Cenários Atmosféricos Precursores de Eventos de Ressaca Na Baía de Guanabara nos anos de 2017 e 2019 utilizando WRF. (Apresentação de Trabalho/Simpósio).
- Melo Filho, E. (1993), "The Sea Sentinels Project: Watching Waves in Brazil", in *Proceedings of 8th Symposium on Coastal and Ocean Management (Coastal Zone)*, American Society of Civil Engineering, pp. 505-517.
- OMM – Organização Meteorológica Mundial (OMM). (1997), *Manual on Codes: International Codes. Vol. 1, Part A – Alpha-numeric Codes*. WMO - No. 306.
- Oliveira, A. S. (1986), Interações entre sistemas frontais na América do Sul e convecção na Amazônia. (INPE-4008-TDL/239). Dissertação de Mestrado em Meteorologia do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1986.
- Oliveira, L.L.; Vianello, R.L.; Ferreira, N.J. (2001), *Meteorologia Fundamental*, Erichim, RS, EDIFAPES, 432 p.
- PETROBRAS – Petróleo Brasileiro SA, disponível em: <https://petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/principais-operacoes/bacias/bacia-de-campos.htm>, acesso em: 05 mar. 2020.
- Parente, C. E. (1999), Uma Nova Técnica Espectral para Análise Direcional de Ondas. Tese de Doutorado da Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Pinho, U. F. (2003), Caracterização dos estados de mar na Baía de Campos. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Phillips, O. M. (1986), *The Dynamics of the Upper Ocean*. Cambridge University Press, 261 p.
- Pond, S.; Pickard, G.L. (1983), *Introductory Dynamical Oceanography*, 2nd ed., 329 pp., Pergamon, New York.
- Reboita, M. S. (2008), Ciclones Extratropicais sobre o Atlântico Sul: Simulação Climática e Experimentos de Sensibilidade. Tese de Doutorado em Meteorologia do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – IAG–USP.
- Saha, S.; Moorthi, S.; Pan, H. L.; Wu, X.; Wang, J.; Nadiga, S.; CK Tripp, P.; Kistler, R.; EN, J. W.; D Behringer, D.; LIU, H.; Stokes, D.; Grumbine, R.; Gayno, G.; Wang, J.; HOU, Y. T.; Chuang, H. Y.; Juang, H. M. H.; Sela, J.; Iredell, M.; Treadon, R.; Kleist, D.; T. P. V. D.; Keyser, D.; Derber, J.; EK, M.; E Meng, J.; Wei, H.; An Yang, R.; Lord, S.; Van Den Dool, H.; Kumar, A.; U Wang, W.; Long, C.; Iah, M. C.; Xue, Y.; N Huang, B.; Schemm, J. K.; EY Ebisuzaki, W.; Lin, R.; Xie, P.; Chen, M.; Zhou, S.; Higgins, W.; Zou, C. Z.; Liu, Q.; Chen, Y.; Han, Y.; Cucurull, L.; Reynolds, R. W.; Rutledge, G.; Goldberg, M. (2010). The NCEP climate forecast system reanalysis. *American Meteorological Society*, Vol. 91, pp. 1015–1057.
- Sant'Anna, C. L. M. L. (2018), Estimativa de Quantis Extremos de vento como suporte ao dimensionamento de edificações, Monografia, Orientador: Otto Corrêa Rotunno Filho.
- Silva, P. E. D. (2013). "Caracterização do padrão de ondas na costa do Brasil por meio de modelagem numérica". Dissertação de Mestrado. São José dos Campos, SP, Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- Silva, F.L.C. (2008), *Investigações sobre a chegada de ondulações (swell) em situações de bom tempo na Baía de Campos*. Dissertação de Mestrado - COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
- Silva, Natalia Pillar da. (2013), Extremos de vento sobre o Oeste do Oceano Atlântico Sul: análise direcional das ocorrências. Dissertação de Mestrado em Meteorologia do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013, acesso em: 2020-07-16.
- Simiu, E.; Heckert, N. A. (1996). Extreme wind distribution tails: a 'peaks-over-threshold' approach. *J. Struct. Eng.*, Vol. 122, pp. 539–547.
- Sinclair, M. R. (1995), A climatology of cyclogenesis for the Southern Hemisphere. *Monthly Weather Review*, Vol. 123, pp. 1601-1619.
- Zar, J. H. (1988), *Biostatistical Analysis*. 4. ed., United States of America, Prentice Hall, 916 p.

Recebido: 12 ago. 2019

Aprovado: 09 mar. 2021

DOI: 10.20985/1980-5160.2021.v16n1.1703

Como citar: Dias, E.M., Palmeira, A.C.P.A., Libonati, R. (2021). Estimativa dos períodos de retorno da velocidade e rajada do vento e altura significativa das ondas no atlântico sudoeste. *Revista S&G* 16, 1, 84-100. <https://revistasg.emnuvens.com.br/sg/article/view/1703>