

ANÁLISE ESPACIAL DA DISTRIBUIÇÃO DA VELOCIDADE DO VENTO NO NORDESTE BRASILEIRO UTILIZANDO A ERA-40

Lêda Valéria Ramos SANTANA¹
Tatijana STOŠIĆ¹
Cláudia Helena DEZOTTI¹
Geber Barbosa de Albuquerque MOURA²
Luiz Henrique Gama Dore de ARAÚJO¹
Antonio Samuel Alves da SILVA¹

- RESUMO: Neste trabalho foram analisadas séries temporais da velocidade do vento diária na região Nordeste do Brasil. Os dados utilizados foram obtidos por meio da reanálise ERA-40 para o período de 1958 a 2001 com intuito de verificar quais dentre as distribuições de probabilidade, Weibull, Gamma Generalizada e Rayleigh, melhor descreve o comportamento probabilístico da velocidade do vento na região. Neste sentido, foram feitas análises espaciais por meio do Inverse Distance Weighting para o p – valor e para os parâmetros estimados. Os dados mostram que em média as maiores velocidades e a menor variabilidade da velocidade vento concentram-se na região da Zona da Mata. Através do ajuste verificou-se que a distribuição Weibull de dois parâmetros representou melhor a distribuição da velocidade do vento na maior parte do NE brasileiro.
- PALAVRAS-CHAVE: Reanálise; orografia; distribuição; interpolação.

1 Introdução

A crescente preocupação com questões ambientais e o consenso mundial sobre a promoção do desenvolvimento em bases sustentáveis incentiva a produção de energia elétrica através de fontes renováveis, como por exemplo o vento. Este

¹Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE, Dois Irmãos, DEINFO, CEP: 52171-900, Recife, PE, Brasil. Email: valeria_araua@hotmail.com; tastosic@gmail.com; dezotti@deinfo.ufrpe.br; samuelpmatematico@yahoo.com.br

²Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE, Dois Irmãos, DEPA, CEP: 52171-900, Recife, PE, Brasil. Email: geber@depa.ufrpe.br

tem ganhado relevância depois da crise do petróleo na década de 70, manifestando assim o interesse de vários países na exploração deste recurso, bem como incentivado pesquisas na busca do entendimento de seu comportamento e de sua relação com variáveis climáticas (Santos, Stosic e Stosic, 2012; Ramos e Seidler, 2011; Hennessey, 1977; Justus, Hargraves e Yalcin, 1976).

Atualmente o Brasil é considerado o maior produtor de energia eólica quando comparado aos países da América Latina e do Caribe. As regiões Norte (N) e Nordeste (NE) brasileiras são classificadas como áreas com os melhores potenciais para aplicações de energia eólica (Alves, 2010). Particularmente, o vento no NE é caracterizado por possuir um ciclo anual bem definido assim como é favorecido com a intensidade e constância dos ventos Alísios, implicando em condições apropriadas para a exploração desse recurso como alternativa energética. Contudo, o estudo em larga escala para região NE é dificultado pelo fato que a região ocupa uma extensa área territorial, com aproximadamente $1.558.196 \text{ Km}^2$, bem como é composta por quatro sub-regiões (Meio Norte, Sertão, Agreste e Zona da Mata) com características distintas de relevo que afetam o comportamento da velocidade do vento (ANEEL, 2005), além de sua variabilidade está intrinsecamente relacionada aos fenômenos meteorológicos (Oliveira e Costa, 2011).

A velocidade do vento é analisada pelas componentes zonal e meridional do vento que contribuem para o estudo de variáveis climáticas, e sofrem a influência de sistemas climáticos, como por exemplo, as Zonas de Convergência Intertropical (ZCIT) que enfraquecem ou fortalecem a componente meridional do vento no NE, próximo ao Atlântico Norte (Geber et al., 2009; Silva e Brito, 2009).

O conhecimento das funções de distribuição ou densidade de probabilidade da velocidade do vento, bem como a identificação do potencial eólico em diversas áreas do planeta tem sido bastante explorada. As distribuições Weibull, Gama Generalizada, Rayleigh, Log-Normal, encontram-se entre as funções de distribuição que melhor representam a frequência da velocidade do vento (Kiss e János, 2008; Carta, Ramirez e Velazquez, 2009; Silva et al., 2004; Hennessey, 1977; Justus, Hargraves e Yalcin, 1976).

Várias instituições disponibilizam informações sobre velocidade do vento em diferentes pontos do território nacional e mundial, como o European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE). Portanto o objetivo do trabalho é analisar dados da reanálise ERA-40, para avaliar em larga escala as funções de distribuições de probabilidade que melhor se ajustam a distribuição da velocidade do vento na região NE do Brasil e ainda mostrar de forma espacial estes ajustes e o comportamento de seus parâmetros.

2 Material e métodos

Os dados da reanálise ERA-40 estão disponíveis no endereço eletrônico [http://data-portal.ecmwf.int/data/d/era40_daily/\(ECMWF\(2013\)\)](http://data-portal.ecmwf.int/data/d/era40_daily/(ECMWF(2013))) em for-

mato *.grib para diversas variáveis de carácter ambiental. Os dados correspondem ao período de 01 de janeiro de 1958 a 31 de dezembro de 2001, com registros diários, em m/s, realizados nas quatro principais horas sinóticas diárias (00 h, 06 h, 12 h, 18 h). As variáveis do estudo encontram-se a 10 m acima do solo com resolução espacial de 2.5° x 2.5° (lat./long.).

O arquivo *.grib tem leitura complexa sendo então transformado para o formato *.dat e lido no software R-project (R, 2008), onde foram identificadas as coordenadas e suas respectivas informações de registros diários durante os 44 anos de observações (1958-2001). Estas informações são representadas por pontos de grade que cobrem todo o mundo. A área geográfica que corresponde à região NE do Brasil compreendendo 72 pontos de grade (Figura 1), localizados entre os meridianos 48° 05' W a 35° 02' W e paralelos 1° S a 18° 05' S. A variável analisada será obtida pela velocidade escalar, Eq.1

$$s = \sqrt{u^2 + v^2}. \quad (1)$$

Onde s é a velocidade escalar do vento, u é a variável zonal da direção do vento no sentido Oeste-Leste e v é a variável meridional da direção do vento no sentido Norte-Sul.

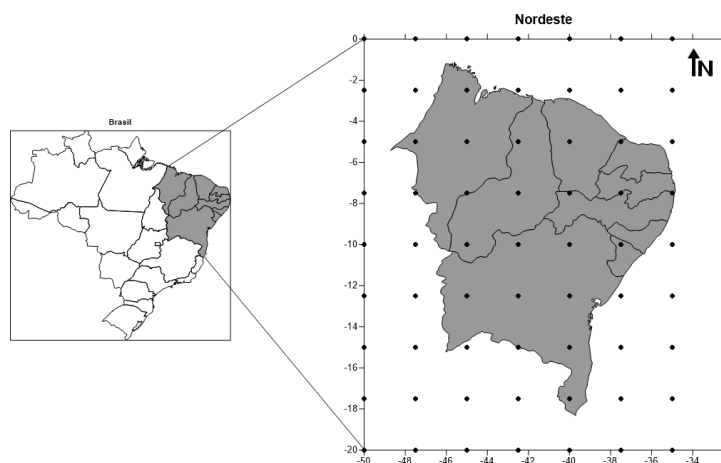


Figura 1 - Pontos de grade sobre a região NE.

Para cada ponto de grade foram feitas análises estatísticas a respeito do comportamento da velocidade vento na área do NE correspondente a cerca de 1 558 196 km². Nas análises espaciais foram confeccionados mapas, utilizando-se do método de interpolações IDW ($p = 2$). Os testes de aderência usados identificaram as funções de distribuição de probabilidade (FDP) que melhor representam os dados, e a estimação dos parâmetros foi feita pelo método da Máxima Verossimilhança. Para o cálculo das análises utilizou-se o software R.

2.1 Teste de aderência

Para testar a aderência dos dados a uma determinada distribuição são usados testes como Qui-Quadrado (χ^2) e Kolmogorov-Smirnov (KS), ambos aplicados em amostras grandes e em distribuições de probabilidade contínua (JOHNSON, 2000). O teste não-paramétrico Qui-Quadrado (χ^2) é dado por:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (2)$$

onde n é o número de classes utilizadas, O_i é a frequência observada no i -ésimo intervalo e E_i é a frequência esperada.

Assim como o χ^2 o teste de Kolmogorov-Smirnov (KS) verifica o ajuste dos dados a uma determinada distribuição. O KS é obtido pela máxima diferença entre a frequência acumulada estimada e a observada (JOHNSON, 2000):

$$D = \max(F(X) - S(X)) \quad (3)$$

onde, $F(X)$ é a frequência estimada e $S(X)$ é a frequência observada.

2.2 Distribuição Weibull

A distribuição Weibull proposta por Waloddi Weibull (1954) é usada em estudos de tempo de vida e previsão de falhas de equipamentos, apresentando um bom ajuste à distribuição de frequência dos dados de velocidade do vento (Justus, Hargraves e Yalcin, 1976). A escolha desta distribuição está relacionada à sua flexibilidade e a estimação de apenas dois parâmetros.

A função densidade de probabilidade (fdp) e a função de distribuição acumulada (FDP) da Weibull de dois parâmetros ($W1$) são expressas respectivamente nas Eqs. Eq.2 e Eq.3.

$$f_{W1} = \left(\frac{k}{s_0}\right) \left(\frac{s}{s_0}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{s}{s_0}\right)^k\right], \quad (4)$$

$$F_{W1} = 1 - \exp\left[-\left(\frac{s}{s_0}\right)^k\right], \quad (5)$$

$k, s_0 > 0$ e $0 < s < \infty$.

sendo k é o parâmetro de forma (adimensional), s_0 é o parâmetro de escala (dimensão de velocidade) e s é a variável aleatória velocidade do vento.

Em relação aos parâmetros da $W1$ observamos que k é inversamente proporcional à variância da velocidade do vento em torno da média, ou seja, quanto maior os valores de k menor a variância e vice-versa (Hennessey, 1977; Justus, Hargraves e Yalcin, 1976). Quanto maior a constância do vento, maior é o fator

de forma e mais concentrado é o gráfico, ou seja, mais estreita e mais pontuda é a curva. O fator de escala s_0 está relacionada com a média.

$$\bar{s} = s_0 \Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right) \quad (6)$$

$$\sigma^2 = s_0^2 \left\{ \Gamma \left(1 + \frac{2}{k} \right) - \left[\Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right) \right]^2 \right\} \quad (7)$$

onde \bar{s} é a média da velocidade do vento, s_0 é o parâmetro de escala, k é o parâmetro de forma, σ^2 é o desvio padrão e Γ é o fator de correção da função Gama.

A distribuição $W1$ possui casos particulares, quando seu parâmetro de forma $k=1$ tem-se uma distribuição exponencial e, para $k=2$ tem-se a distribuição Rayleigh. Uma generalização da $W1$ é a Weibull de três parâmetros ($W2$) (Eq.6), sua fdp é dada por (KISS e JÁNOSI, 2008).

$$f_{W2} = \left(\frac{k}{s_0} \right) \left(\frac{s - \mu}{s_0} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{s - \mu}{s_0} \right)^k \right], \quad (8)$$

onde k é o parâmetro de forma (adimensional), s_0 é o parâmetro de escala (dimensão de velocidade), s é a variável aleatória velocidade do vento e μ é o parâmetro de localização.

2.3 Distribuição Gama Generalizada

A distribuição Gama Generalizada (GG) é bastante favorável na análise de sobrevivência, e pelo fato da distribuição Weibull de dois parâmetros ($W1$) apresentar algumas restrições no parâmetro de forma, k , em ambas as caudas, pode ser generalizada obtendo-se assim uma GG (STACY, 1962),

$$f_{W1}(s; s_0; k, \epsilon) = \left(\frac{k}{s_0 \Gamma(\epsilon)} \right) \left(\frac{s}{s_0} \right)^{\epsilon k - 1} \exp \left[- \left(\frac{s}{s_0} \right)^k \right], \quad (9)$$

$s_0 > 0$, k é um inteiro positivo e $s_0 \leq s < \infty$.

Onde k é o parâmetro de forma, s_0 é o parâmetro de escala, $\Gamma(\epsilon)$ é o fator de correção Gamma e ϵ é o parâmetro que melhora a flexibilidade do parâmetro de forma.

Casos especiais da distribuição GG são considerados quando, $\epsilon \equiv 1$ (distribuição Weibull), $k \equiv 1$ (distribuição Gama), $\epsilon \rightarrow \infty$ (distribuição Log-Normal) e $k \equiv 2$ (subfamília da GG , a distribuição Normal Generalizada) (KISS e JÁNOSI, 2008).

Uma propriedade importante das distribuições GG é que a família é fechada sob a possibilidade de transformações de energia. Isto é, $s > 0$ se obedece $F(z; z_0^p, k/p, \epsilon)$. Esta propriedade pode ser imediatamente explorada para estimar o potencial de energia eólica, uma vez que é proporcional ao cubo da velocidade do vento, s^3 (KHODABIN e AHMADABADI, 2010).

2.4 Estimação de Máxima Verossimilhança

A Máxima Verossimilhança é um método para estimação dos parâmetros de uma função de distribuição, considerado o mais preciso, com seus estimadores obtidos a partir da maximização da função de verossimilhança. Logo, tendo uma amostra aleatória de tamanho n de uma variável aleatória X com $f_{dp}(x/\theta)$, a função de verossimilhança de θ é expressa na Eq.8 (BOLFARINE e SANDOVAL, 2010):

$$L(\theta; x) = \prod_{i=1}^n f(x_i/\theta) \quad (10)$$

Na Eq.8, L é função de θ e representa um único parâmetro ou um vetor de parâmetros. O logaritmo natural da função de verossimilhança de θ e o estimador de Máxima Verossimilhança é dado respectivamente pelas Eqs. Eq:9 e Eq:10.

$$l(\theta; x) = \log L(\theta; x), \quad (11)$$

$$l'(\theta; x) = \frac{\partial l(\theta; x)}{\partial \theta} = 0. \quad (12)$$

No entanto para se concluir que a solução da (Eq.10) é um ponto de máximo, é necessária verificar a Eq. (11),

$$l''(\hat{\theta}; x) = \frac{\partial^2 \log L(\theta; x)}{\partial \theta^2} \quad (13)$$

Os estimadores de máxima verossimilhança possuem duas propriedades importantes, o princípio da invariância e a propriedade de que para amostras grandes os estimadores são eficientes e não viesados.

2.5 Inverse distance weighting (IDW)

O Inverse Distance Weighting (IDW) é um método de interpolação proposto por (Shepard, 1968) que combina a ideia de proximidade, supondo que pontos mais próximos são mais semelhantes do que aqueles que estão mais distantes, ou seja, os valores medidos mais próximos ao local de previsão terão maior influência sobre o valor previsto, admitindo uma influência que diminuirá com a distância (LUO, TAYLOR e PARKER, 2008). A expressão matemática do IDW é dada por,

$$\hat{Z}_{s_0} = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z_{s_i}, \quad (14)$$

onde \hat{Z}_{s_0} é o valor estimado para o local s_0 , N é o número de pontos observados, λ_i são os pesos atribuídos a i -ésima localidade e Z_{s_i} é o valor observado. O peso é determinado pelas seguinte equação

$$\lambda_i = \frac{d_{i0}^{-p}}{\sum_{i=1}^N d_{i0}^{-p}}, \quad \text{onde} \quad \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (15)$$

Quando a distância torna-se maior, o peso é reduzido a um fator p . Sendo d_{i0} a distância entre o local de previsão s_0 , e os locais medidos s_i . Os pesos serão dimensionados de forma que a sua soma será igual a 1.

3 Resultados e discussão

A média da velocidade escalar do vento (Figura 2A) no NE do Brasil está entre 1.8 e 6.4 m/s a 10 m, apresentando de acordo com a escala Beaufort (Rosa e Filho, 2007), ventos definidos como de ar leve até ventos fortes, variando de acordo com a orografia da região. Percebe-se também através da média (Figura 2A) que há um limiar dividindo os ventos mais fortes próximos ao litoral, dos ventos mais calmos no Meio-Norte, esse limite predomina no Sertão da Região que sofre a interferência na circulação dos ventos, causada por fenômenos naturais e, a presença de relevo como o Planalto da Borborema que faz com que os ventos percam velocidades chegando mais fraco no Oeste da região. Na Figura 2B, nota-se que a variabilidade dos ventos é maior na faixa litorânea onde há ventos mais fortes, favorecido pelos ventos Alísios de leste e as brisas terrestre e marinha.

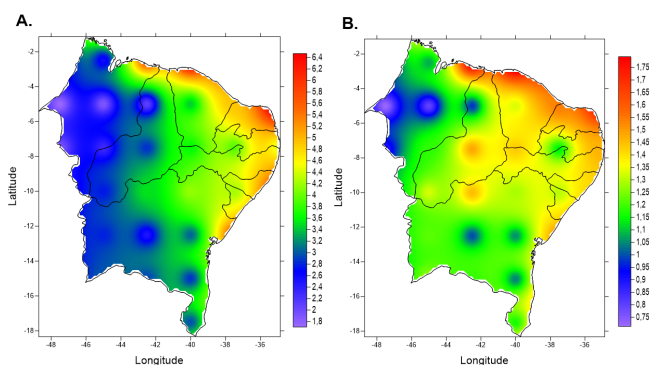


Figura 2 - Média (A) e desvio padrão (B) da distribuição da velocidade do vento no NE.

Na Figura 3A observa-se o comportamento assimétrico dos ventos, na sub-região da zona da mata os ventos mantém maior frequência de alta velocidade, ao contrário do Meio-Norte que apresenta maior frequência da velocidade do vento mais fraca. Ressaltando, a presença do limite que descreve o comportamento mais homogêneo da distribuição da velocidade do vento do Norte do Maranhão até o Sudeste da Bahia. Na Figura 3B, a curtose demonstra um domínio de velocidade do vento de forma heterogênea, ou seja, há muitas variações do vento. Na parte

Oeste a oscilação aumenta pouco, com destaque na divisa entre o Maranhão e Piauí que tem um acréscimo relevante.

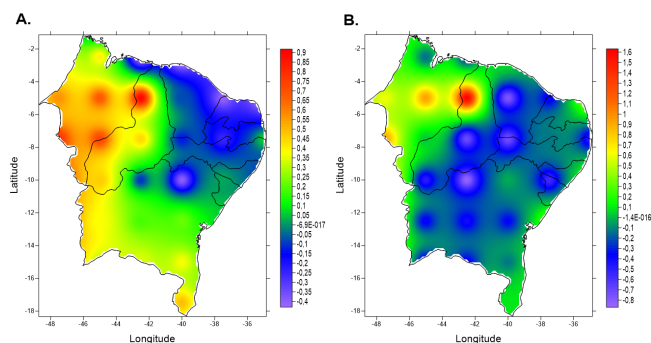


Figura 3 - Assimetria (A) e curtose (B) da distribuição da velocidade do vento no NE.

Na Tabela 1 (Apêndice A), verifica-se o p – valor obtido pelo teste KS para as coordenadas onde as distribuições obteve melhor ajuste, ratificando estudos realizado na região (SILVA et al., 2004); SILVA et al., 2002). Percebe-se então, que a $W2^*$ é a distribuição que adere melhor aos dados. A $W1$ também tem uma boa aderência, enquanto a GG tem a menor representação, porém apresenta um domínio sobre as coordenadas referente ao Oeste do NE caracterizado por velocidade de ventos mais fraca.

Nota-se na Tabela 2 (Apêndice B) o p – valor obtido através do teste do χ^2 para as funções de distribuições ajustadas e, logo percebe-se que a quantidade de coordenadas ajustadas nas distribuições analisadas foi menor para estatística do χ^2 quando comparado ao KS . Observando também que, há coordenadas onde os dois testes conseguiram ajustar mais de uma distribuição e outras onde não houve nenhuma aderência ($-5^\circ \times 47,5^\circ$; $-5^\circ \times 40^\circ$; $-5^\circ \times 37,5^\circ$; $7,5^\circ \times 40^\circ$).

Na análise espacial do ajuste das distribuições obtida pela estatística do Kolmogorov-Smirnov (KS) nota-se que a distribuição $W1$ (Figura 4A) não obteve um bom ajuste em algumas áreas no Sertão e no Meio-Norte. Contudo, ainda consegue ter um bom ajuste por quase todo NE. Na Figura 4B, a distribuição $W2$ representa melhor a região do NE, pois abrange quase toda a área, modelando-se a áreas de ventos fracos até os ventos mais fortes nas quatro sub-regiões, que possui características de relevo distintas. Mas como seu parâmetro de locação assume valores iguais a 0, temos então representado a distribuição $W1$. Já a distribuição GG (Figura 4C) não aderiu tão bem quanto as outras distribuições e, apresenta valores de $\epsilon = 1$ gerando assim a distribuição $W1$.

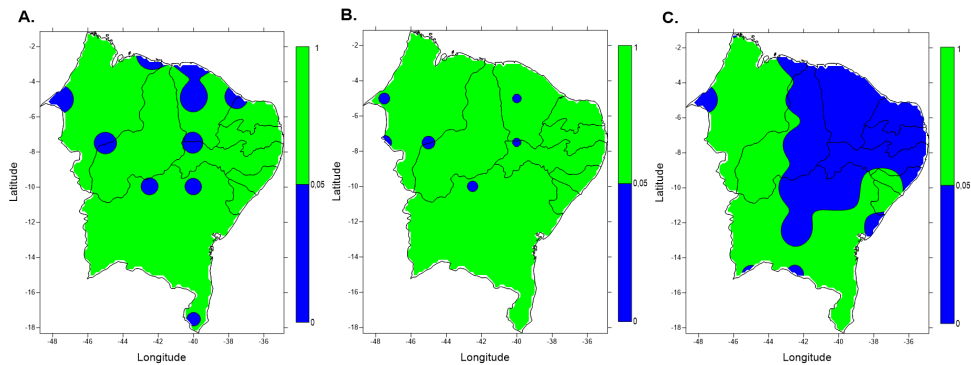


Figura 4 - p - valor espacialmente explícito para as funções de distribuições (A) W_1 , (B) W_2 e (C) GG ajustadas por meio da estatística do KS .

A presença de contornos concêntricos na Figura 4 está associado ao método de interpolação IDW, mostrando a influência de que cada ponto tende a ter um raio de ação definido de forma igual em todas as direções possibilitando a formação dos círculos (Andriotti (2009)).

Após identificar as distribuições que melhor se ajustaram aos dados, foram estimados os parâmetros por meio do método da máxima verossimilhança, Tabela 3 (Apêndice C). Logo, ao analisar o parâmetro de forma k que indica a maior frequência da velocidade do vento, tem-se que as condições mais adequadas para ventos intensos e constantes encontram-se nas coordenadas próximo ao Norte a leste do Atlântico para as distribuições GG e W_2 . Enquanto, para W_1 o parâmetro k mantém menores frequências oscilando entre 2 e 5 m/s em todas as coordenadas. Por meio do parâmetro de escala s_0 , verifica-se maiores valores da velocidade do vento, uma vez que este parâmetro está relacionado com a média da velocidade do vento e abrange as coordenadas de forma similar ao parâmetro de forma (k). O parâmetro ϵ da GG deve ser analisado junto ao de forma k obtendo-se de acordo como os valores encontrados ($\epsilon \equiv 1$), a distribuição W_1 . O mesmo ocorre na distribuição W_2 , para o parâmetro $\mu = 0$, originando a W_1 . Diante dos casos expostos para cada distribuição (W_2 e GG), os parâmetros estimados indicam um melhor ajuste para W_1 .

Através da análise espacial da estimativa dos parâmetros da W_1 (Figura 5A) percebe-se que o parâmetro de forma (k) atinge valores maiores, indicando uma velocidade constante próximo à planície litorânea com uma fronteira que delimita valores inferiores com maiores oscilações do vento. O parâmetro de escala (s_0) (Figura 5B) representa maiores estimativas da velocidade do vento do Norte do Maranhão até Leste da Bahia, e índices menores na parte Oeste do NE.

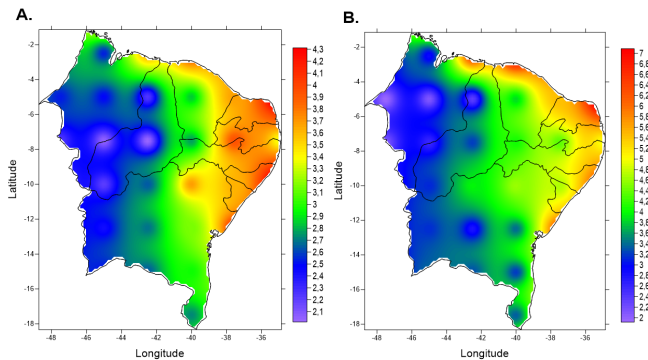


Figura 5 - Parâmetro de forma - k (A) e escala - s_0 (B) da distribuição $W1$ espacialmente explícito.

Os parâmetros da $W2$ mostram um comportamento pouco semelhante entre os parâmetros de forma k (Figura 6A) e escala (Figura 6B), predominando índices mais baixos de velocidade do vento na região. A velocidade mantém-se constante, com oscilações no Norte do Ceará. Na Figura 6C, o parâmetro de locação assume valores iguais a zero na maior parte da região, originado a distribuição $W1$.

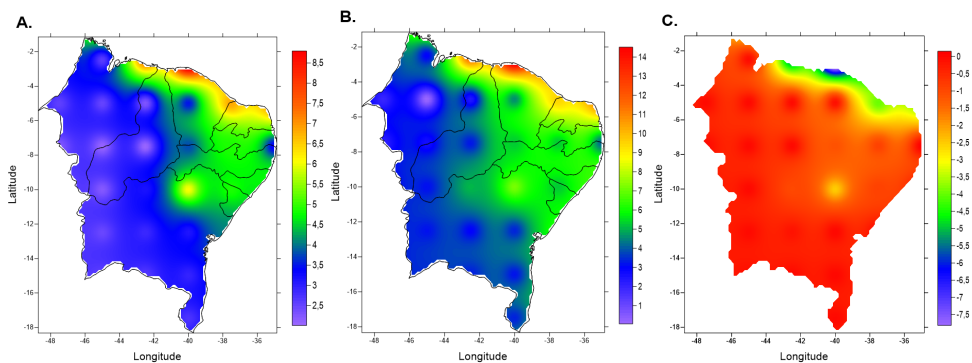


Figura 6 - Estimativa espacialmente explícita para os parâmetros de forma - k (A), escala - s_0 (B) e locação - μ (C) da distribuição $W2$.

Observa-se na Figura 7, os parâmetros da GG que apresentam uma variabilidade maior da velocidade do vento (Figura 7A) no Norte do Atlântico, com a presença de ventos mais fracos (Figura 7B) desde a parte Oeste do Maranhão até o sul da Bahia. Ressaltando a fronteira entre a parte Oeste e leste do NE, que abrange parte do Sertão, com a presença de relevo como a Chapada do Araripe entre o Piauí, Maranhão e o Ceará e a Chapada da Diamantina no centro da Bahia. Essas características provocam ventos mais fortes na parte leste, servindo também

de barreiras naturais fazendo com que os ventos percam força e cheguem mais fracos na parte Oeste. O parâmetro ϵ (Figura 7C) apresenta uma escala com valores menores que influência no parâmetro de forma k , sendo que ao assumir o valor igual a 1 obtêm a distribuição $W1$, verificando esse valor em uma faixa sobre a região NE que nasce no Norte Maranhão passando pelo sul da Bahia envolvendo parte da faixa litorânea.

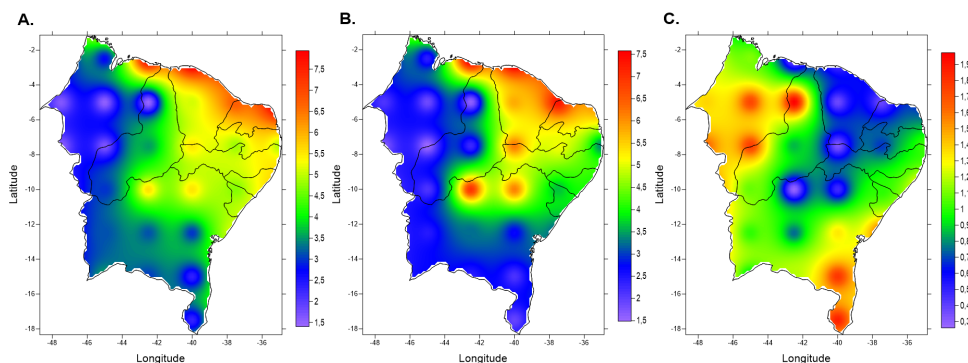


Figura 7 - Estimativa espacialmente explícita para os parâmetros de forma - k (A), escala - s_0 (B) e locação - ϵ (C) da distribuição GG .

A distribuição Weibull mostrou-se mais adequada para modelagem da velocidade do vento no Nordeste. Esta distribuição foi amplamente utilizada em estudos de potencial eólico em diferentes regiões do mundo (He et al., 2010), Shata e Hanitsch (2006; Zhou e Smith, 2013), para estimação da energia gerada por turbinas eólicas (Ayodele et al., 2012), Diaf e Notton, 2013), avaliação da performance dos sistemas autônomas com uso de energia eólica (Celik (2006)) e para desenvolvimento dos modelos estocásticos de previsão (Aksoy et al., 2004; Carapellucci e Giordano, 2013). Os resultados desta análise junto com a análise das estações meteorológicas podem fornecer informações adicionais para uma avaliação mais completa dos vários aspectos de uso da energia eólica na região Nordeste incluindo o desenvolvimento dos novos modelos matemáticos e computacionais de previsão.

Conclusões

A distribuição Weibull de dois parâmetros $W1$ é a distribuição que melhor representa as características do comportamento do vento no NE brasileiro. Apesar da distribuição Weibull de três parâmetros, $W2$, mostrar-se adequada, o valor do seu parâmetro de locação $\mu = 0$, origina a $W1$ em grande parte da Região. Fato semelhante ocorre com a GG , quando $\epsilon \equiv 1$ implica também na $W1$. Logo, será mais interessante trabalhar com modelos mais simples ($W1$), do que com modelos mais complexos (GG e $W2$), que poderão contribuir em estudos para avaliação do potencial eólico do NE, e a influência do vento sobre diversos fenômenos como erosão do solo, precipitação, formação de dunas, dentre outros.

Agradecimentos

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

SANTANA, L. V. R.; STOSIC, T.; DEZOTTI, C. H.; MOURA, G. B. de A.; ARAÚJO, L. H. G. D. de; SILVA, A. S. A. da. Spatial analyses of wind speed in the North-Brazil with data from ERA-40. *Rev. Bras. Biom.*, São Paulo, v.33, n.3, p.414-432, 2015.

■ **ABSTRACT:** *In this work, were analyzed daily time series of wind speed in northeastern Brazil. The data were obtained through the ERA-40 reanalysis for the period 1958-2001 in order to verify which of the probability distribution, Weibull, Gamma and Generalized Rayleigh, better describes the probabilistic behavior of the wind speed in the region. In this sense, were performed spatial analyzes by using the inverse distance weighting for the p-value and the estimated parameters. The Weibull distribution of two parameters was that best represented the distribution of wind speed in most Brazilian NE and the Forest Zone region represented the highest rate and the lowest wind speed variability.*

■ **KEYWORDS:** *Reanalysis; orography; distribution.*

Referências

JUSTUS, C. G.; HARGRAVES, W. R.; YALCIN, Ali. *Nationwide assessment of potential output from wind-powered generators.* Journal of applied meteorology, v.15, n. 7, p.673-678, 1976.

ANEEL, Agência nacional de energia eólica. *Atlas de energia elétrica do Brasil.* 2ed. 2005.

BOLFARINE, H.; SANDOVAL, M. *Introdução a inferência estatística.* 2.ed.2005. ECMWF, European centre for medium-range weather forecasts. <http://apps.ecmwf.int/datasets/>. 2013.

HENNESSEY, J. P. *Some aspects of wind Power statistics.* Journal of Applied Meteorology. v. 16, n.2., fev, p.119-128, 1977.

CARTA, J.; RAMIREZ, P.; VELAQUEZ, S. *A review of wind speed probability distributions used in wind energy analysis.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 13, n.5. p.933-955, 2009.

KISS, P.; JANOSI, I. *Comprehensive empirical analysis of ERA-40 surface wind speed distribution over Europe.* Energy Conversion and Management, v. 49, n.8, ago, p.2142-2151, 2008.

LUO, W.; TAYLOR, M. C; PARKER, S. R. *A comparison of spatial interpolation methods to estimate continuous wind speed surfaces using irregularly distributed data from England and Wales.* International Journal of Climatology, Wiley Online Library, v. 959, p.947-959, 2008.

- SHEPARD, D. *A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data*. ACM, p.517-524, 1968.
- R, DEVELOPMENT CORE TEAM. *R: a language and environment for statistical computing*. <http://www.r-project.org>. 2008.
- STACY, E. *A generalization of the gamma distribution*. The Annals of Mathematical Statistics, v. 33, n.3, p.1187-1192, 1962.
- ALVES, J. J. A. *Análise regional da energia eólica no Brasil*. Rev. Bras. de Gestao e Desenvolvimento Regional, v. 6, n.1, 2010.
- KHODABIN, M.; AHMADABADI, A. *Some properties of generalized gamma distribution*. Mathematical Sciences. v. 4, n.1, p.9-28, 2010.
- GEBER, B. DE A.; DE ARAGAO, J. O. R.; DE MELO, J. S. P.; DA SILVA, A. P. N.; GIONGO, P. R.; LACERDA, F. F. *Relação entre a precipitação do leste do Nordeste do Brasil e a temperatura dos oceanos*. R. Bras. Eng. Agric. Ambiental, v. 13, n. 4, p.462-469, SciELO Brasil, 2009.
- OLIVEIRA, J. L.; COSTA, A. A. *Estudo de variabilidade do vento em escala sazonal sobre o Nordeste brasileiro utilizando o RAMS: Os casos de 1973-1974 e 1982-1983*. Rev. Bras. de Meteorologia, v. 26, n. 1, p.53-66, 2011.
- DA SILVA, D. J. F.; BRITO, J. I. B. *Variabilidade do vento na bacia hidrográfica do rio São Francisco durante a ocorrência da ZCAS*. AMBIÊNCIA. v. 4, n. 2, p.221-235, 2009.
- SILVA, B. B. da; ALVES, J. J. A.; Cavalcanti, E. P.; Ventura, E. D. *Variabilidade espacial e temporal do potencial eólico da direção predominante do vento no Nordeste do Brasil*. Rev. Bras. de Meteorologia, v. 9, n. 2, p.189-202, 2004.
- DE OLIVEIRA SANTOS, M.; STOSIC, T.; STOSIC, B. *Long-term correlations in hourly wind speed records in Pernambuco, Brazil*. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. v. 391, n. 4, p. 1546-1552. Elsevier. 2012.
- ROSA, C. A.; TIAGO FILHO, G. L. *Séries de energias renováveis*. 2007, p.48.
- SILVA, B. B. DA; ALVES, J. J. A.; CAVALCANTI, E. P.; DANTAS, R. T. *Potencial eólico na direção predominante do vento no Nordeste brasileiro*. Rev. Bras. de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 6, dez, p.431-439, Scielo, 2002.
- RAMOS, F. G.; SEIDLER, N. *Estudo da energia eólica para aproveitamento em pequenos empreendimentos*. Rev. Eletônica de Extensão da URI, v. 7, n. 13, 2011.
- JOHNSON, R. A. *Probability and statistics for engineers*. 8.ed. United States of America, 2000, 1-784p.
- HE, Y.; MONAHAN, A. H.; JONES, C. G.; DAI, A.; BINER, S.; CAYA, D.; WINGER, K. *Probability distributions of land surface wind speeds over North America*. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, Wiley Online Library, v. 115, n. D4, p.1984-2012, 2010.
- SHATA, A. A.; HANITSCH, R. *Evaluation of wind energy potential and electricity generation on the coast of Mediterranean Sea in Egypt*. Renewable Energy, Elsevier, v. 31, n. 8, p.1183-1202, 2006.
- ZHOU, Y.; SMITH, S. J. *Spatial and temporal patterns of global onshore wind speed distribution*. Environmental Research Letters, IOP Publishing, v.8, n. 3, 2013.

- AYODELE, T. R.; JIMOH, A. A.; MUNDA, J. L.; AGEE, J. T. *Wind distribution and capacity factor estimation for wind turbines in the coastal region of South Africa*. Energy Conversion and Management, Elsevier, v.64, p.614-625, 2012.
- DIAF, S.; NOTTON, G. *Technical and economic analysis of large-scale wind energy conversion systems in Algeria*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, v. 19, p.37-51, 2013.
- CELIK, A. N. *A simplified model for estimating yearly wind fraction in hybrid-wind energy systems*. Renewable energy, Elsevier, v. 31, n. 1, p.105-118, 2006.
- AKSOY, H.; TOPRAK, Z. F.; AYTEK, A.; UNAL, N. E. *Stochastic generation of hourly mean wind speed data*. Renewable energy, Elsevier, v. 29, n. 14, p.2111-2131, 2004.
- CARAPPELLUCCI, R.; GIORDANO, L. *A methodology for the synthetic generation of hourly wind speed time series based on some known aggregate input data*. Applied Energy, v. 101, p.541-550, 2013.
- ANDRIOTTI, J. L. S. *Fundamentos de estatística e geoestatística*. 2.ed. Unisinos, São Leopoldo, RS, 2009.

Recebido em 10.02.2015.

Aprovado após revisão em 16.06.2015.

Apêndice A

Tabela 1: p – valor do teste de Kolmogorov-Smirnov para as coordenada em que teve ajuste das distribuições de probabilidade.

Latitude	Longitude	Dist.	KS	Latitude	Longitude	Dist.	KS
0	-50	GG	0,17	-12,5	-42,5	W2	0,48
0	-47,5	W2*	0,75	-12,5	-42,5	W1	0,41
0	-45	W2*	0,72	-12,5	-40	GG	0,07
0	-42,5	W2*	0,80	-12,5	-40	W2*	0,39
0	-40	W2*	0,68	-12,5	-40	W1	0,28
0	-37,5	W2*	0,75	-12,5	-37,5	W2*	0,16
0	-35	W2*	0,47	-12,5	-37,5	W1	0,09
0	-32,5	W2*	0,88	-12,5	-35	W2*	0,66
-2,5	-47,5	W1	0,09	-12,5	-35	W1	0,52
-2,5	-47,5	W2*	0,15	-12,5	-32,5	W2*	0,22
-2,5	-45	GG	0,07	-15	-50	W2*	0,15
-2,5	-45	W2*	0,28	-15	-50	W1	0,15
-2,5	-45	W1	0,22	-15	-47,5	GG	0,06
-2,5	-42,5	W2*	0,40	-15	-47,5	W2*	0,91
-2,5	-40	W2*	0,86	-15	-47,5	W1	0,93
-2,5	-37,5	W2*	0,93	-15	-45	W2*	0,53
-2,5	-32,5	W2*	0,07	-15	-45	W1	0,48
-5	-45	GG	0,55	-15	-42,5	W2*	0,75
-5	-45	W2*	0,36	-15	-40	W2*	0,54
-5	-45	W1	0,19	-15	-40	W1	0,49
-5	-42,5	W2*	0,15	-15	-37,5	GG	0,09
-5	-42,5	W1	0,10	-15	-37,5	W2*	0,05
-5	-35	W2*	0,57	-15	-37,5	W1	0,10
-5	-32,5	W2*	0,69	-15	-35	W2*	0,19
-7,5	-50	W2*	0,13	-15	-32,5	W2*	0,33
-7,5	-50	W1	0,08	-17,5	-50	W2*	0,14
-7,5	-47,5	GG	0,07	-17,5	-50	W1	0,10
-7,5	-47,5	W1	0,06	-17,5	-47,5	GG	0,24
-7,5	-45	GG	0,15	-17,5	-45	GG	0,50
-7,5	-42,5	W2*	0,06	-17,5	-45	W2*	0,19
-7,5	-42,5	W1	0,06	-17,5	-45	W1	0,15
-7,5	-37,5	W2*	0,95	-17,5	-42,5	GG	0,39
-7,5	-37,5	W1	0,22	-17,5	-42,5	W2*	0,53
-7,5	-35	W2*	0,60	-17,5	-40	GG	0,26
-7,5	-35	W1	0,80	-17,5	-40	W2*	0,11
-7,5	-32,5	W2*	0,54	-17,5	-37,5	W2*	0,16
-7,5	-32,5	W1	0,34	-17,5	-37,5	W1	0,09
-10	-47,5	GG	0,42	-17,5	-35	W2*	0,37

-10	-47,5	W1	0,13	-17,5	-35	W1	0,15
-10	-45	GG	0,06	-17,5	-32,5	W2*	0,58
-10	-45	W2*	0,11	-17,5	-32,5	W1	0,05
-10	-45	W1	0,12	-20	-50	GG	0,30
-10	-40	W2*	0,66	-20	-50	W2*	0,06
-10	-37,5	GG	0,12	-20	-47,5	GG	0,19
-10	-37,5	W2*	0,56	-20	-45	GG	0,31
-10	-37,5	W1	0,09	-20	-42,5	GG	0,19
-10	-35	W2*	0,71	-20	-42,5	W2*	0,37
-10	-35	W1	0,75	-20	-42,5	W1	0,34
-10	-32,5	W2*	0,91	-20	-40	W2*	0,71
-10	-32,5	W1	0,75	-20	-40	W1	0,21
-12,5	-50	W2*	0,24	-20	-37,5	W2*	0,35
-12,5	-50	W1	0,22	-20	-37,5	W1	0,10
-12,5	-47,5	GG	0,15	-20	-35	W2*	0,17
-12,5	-45	GG	0,13	-20	-35	W1	0,12
-12,5	-45	W2*	0,12	-20	-32,5	W2*	0,48
-12,5	-45	W1	0,15	-	-	-	-

*Distribuição que melhor se ajustou aos dados.

Apêndice B

Tabela 2: p -valor do teste de aderência de χ^2 para as coordenada em que teve ajuste das distribuições de probabilidade.

Latitude	Longitude	Dist.	χ^2	Latitude	Longitude	Dist.	χ^2
0	-50	GG	0,13	-12,5	-35	W2*	0,18
0	-47,5	W2*	0,52	-12,5	-35	W1	0,16
0	-45	W2*	0,63	-15	-50	W1	0,07
0	-42,5	W2*	0,24	-15	-47,5	GG	0,13
0	-40	W2*	0,11	-15	-47,5	W2*	0,86
0	-35	W2*	0,83	-15	-47,5	W1	0,82
0	-32,5	W2*	0,43	-15	-45	W2*	0,47
-2,5	-45	GG	0,19	-15	-45	W1	0,10
-2,5	-42,5	W2*	0,15	-15	-42,5	GG	0,11
-2,5	-40	W2*	0,48	-15	-42,5	W2*	0,07
-2,5	-37,5	W2*	0,80	-15	-40	GG	0,07
-2,5	-35	W2*	0,34	-15	-40	W2*	0,32
-5	-45	GG	0,29	-15	-40	W1	0,42
-5	-42,5	GG	0,10	-15	-37,5	GG	0,07
-5	-35	W2*	0,07	-15	-35	W2*	0,27
-5	-32,5	W2*	0,31	-15	-32,5	W2*	0,14
-7,5	-50	GG	0,06	-17,5	-47,5	GG	0,38
-7,5	-42,5	GG	0,05	-17,5	-45	GG	0,76
-7,5	-37,5	W2*	0,68	-17,5	-42,5	GG	0,53
-7,5	-37,5	W1	0,26	-17,5	-42,5	W2*	0,08
-7,5	-35	W2*	0,64	-17,5	-40	GG	0,08
-7,5	-35	W1	0,64	-17,5	-35	W2*	0,70
-7,5	-32,5	W2*	0,35	-17,5	-35	W1	0,05
-7,5	-32,5	W1	0,14	-17,5	-32,5	W2*	0,24
-10	-47,5	GG	0,54	-20	-50	GG	0,56
-10	-47,5	W1	0,09	-20	-47,5	GG	0,13
-10	-45	GG	0,11	-20	-42,5	GG	0,09
-10	-40	W2*	0,35	-20	-42,5	W2*	0,23
-10	-37,5	GG	0,22	-20	-42,5	W1	0,17
-10	-37,5	W2*	0,33	-20	-40	W2*	0,85
-10	-35	W2*	0,87	-20	-40	W1	0,05
-10	-35	W1	0,90	-20	-37,5	W2*	0,27
-10	-32,5	W2*	0,44	-20	-35	W2*	0,52
-12,5	-45	GG	0,11	-20	-35	W1	0,19
-12,5	-40	W2*	0,12	-20	-32,5	W2*	0,29
-12,5	-40	W1	0,09	-	-	-	-

*Distribuição que melhor se ajustou aos dados.

Apêndice C

Tabela 3: Parâmetros estimados das funções de distribuições ajustadas.

Lat.	Long.	Gama General.			Weibull (W1)		Weibull (W2)		
		k	s_0	ϵ	k	s_0	k	s_0	μ
0	-50	2,28	2,37	1,47	2,84	2,9	2,86	2,92	-0,02
0	-47,5	6,68	7,37	0,44	3,87	6,15	6,82	10,23	-3,98
0	-45	6,82	7,58	0,48	4,22	6,49	7,5	10,96	-4,38
0	-42,5	7,11	8,03	0,49	4,42	6,94	8,02	11,97	-4,94
0	-40	6,78	8,01	0,51	4,35	6,94	7,15	10,94	-3,91
0	-37,5	6,9	7,83	0,46	4,13	6,64	7,04	10,76	-4,03
0	-35	7,34	7,57	0,4	3,94	6,26	7,3	10,91	-4,55
0	-32,5	7,24	7,3	0,38	3,75	5,94	6,9	10,25	-4,2
-2,5	-50	2	1,51	1,68	2,68	2,05	2,67	2,04	0,01
-2,5	-47,5	2,13	1,94	1,37	2,56	2,32	2,58	2,34	-0,01
-2,5	-45	2,36	2,71	1,12	2,53	2,87	2,56	2,91	-0,03
-2,5	-42,5	7,95	7,97	0,32	3,61	6,32	7,29	11,82	-5,37
-2,5	-40	8,64	9,12	0,33	3,98	7,4	10,67	18,17	-10,61
-2,5	-37,5	8,15	9,17	0,36	4,04	7,54	9,69	16,69	-9,01
-2,5	-35	8,2	8,5	0,35	3,96	6,93	10,14	16,3	-9,23
-2,5	-32,5	8,41	8,01	0,33	3,93	6,5	11,33	17,06	-10,41
-5	-47,5	2,09	1,59	1,38	2,52	1,91	2,53	1,92	-0,01
-5	-45	1,82	1,46	1,74	2,48	2,08	2,47	0,01	0,01
-5	-42,5	1,53	1,39	1,98	2,23	2,32	2,23	2,32	0
-5	-40	5,8	5,1	0,36	2,84	3,84	3,45	4,53	-0,06
-5	-37,5	7,36	6,74	0,37	3,68	5,43	6,86	9,5	-3,97
-5	-35	6,22	8,87	0,63	4,67	8,03	7,17	11,92	-3,82
-5	-32,5	7,04	8,04	0,53	4,66	7,08	9,02	13,02	-5,86
-7,5	-50	2,11	1,68	1,23	2,39	1,9	2,41	1,91	-0,01
-7,5	-47,5	1,7	1,51	1,62	2,23	2,11	2,22	2,11	0,01
-7,5	-45	1,47	1,64	1,77	2,04	2,58	2,03	2,58	0
-7,5	-42,5	2,22	3,52	0,85	2,01	3,2	2	3,19	0,01
-7,5	-40	6,21	5,51	0,32	2,76	4,05	3,77	5,26	-1,13
-7,5	-37,5	5,07	4,81	0,67	3,95	4,33	4,87	5,24	-0,88
-7,5	-35	3,34	4,95	1,02	3,38	4,99	3,25	4,09	0,17
-7,5	-32,5	5,08	7,24	1,01	5,11	7,26	5,79	8,15	-0,88
-10	-50	2,18	1,9	1,15	2,37	2,05	2,39	2,07	-0,02
-10	-47,5	1,47	1,42	1,81	2,05	2,28	2,05	2,27	0,01
-10	-45	2,1	2,97	1,08	2,2	3,11	2,19	3,1	0,01

-10	-42,5	7,01	5,58	0,26	2,64	3,96	3,15	5,01	-0,98
-10	-40	6,17	5,54	0,46	3,69	4,61	6,11	7,22	-2,54
-10	-37,5	3,63	4,69	1	3,62	4,68	4,87	5,24	-0,88
-10	-35	3,86	5,87	1,5	4,86	6,64	4,83	6,6	0,04
-10	-32,5	4,07	6,54	1,47	5,09	7,32	5,07	7,3	0,03
-12,5	-50	1,78	1,67	1,51	2,25	2,2	2,24	2,19	0
-12,5	-47,5	1,45	1,54	1,87	2,06	2,53	2,05	2,52	0,01
-12,5	-45	2,42	3,13	1	2,43	3,13	2,44	3,14	-0,01
-12,5	-42,5	3,23	3,13	0,74	2,68	2,77	2,86	2,93	-0,14
-12,5	-40	2,65	2,97	1,33	3,15	3,38	3,11	3,34	0,04
-12,5	-37,5	3,11	5,21	1,67	4,14	6,31	4,08	6,23	0,08
-12,5	-35	3,61	6,11	1,41	4,41	6,85	4,4	6,83	0,01
-12,5	-32,5	4	6,68	1,3	4,66	7,23	4,78	7,41	-0,17
-15	-50	1,78	1,61	1,48	2,23	2,09	2,22	2,09	0
-15	-47,5	1,86	1,75	1,48	2,33	2,26	2,33	2,25	0
-15	-45	2,7	3,58	0,88	2,49	3,37	2,54	3,42	-0,05
-15	-42,5	2,39	3,01	1,18	2,64	3,28	2,64	3,28	0
-15	-40	2,11	2,3	1,8	2,95	3,18	2,92	3,15	0,03
-15	-37,5	2,5	4,81	1,66	3,33	6,1	3,32	6,09	0,01
-15	-35	3,69	6,5	1,06	3,82	6,62	4,1	7,07	-0,43
-15	-32,5	4,23	7,14	0,94	4,07	7,01	4,62	7,86	-0,82
-17,5	-50	1,86	1,89	1,54	2,38	2,49	2,37	2,49	0
-17,5	-47,5	1,61	1,82	1,85	2,28	2,83	2,26	2,81	0,02
-17,5	-45	2,03	2,27	1,43	2,5	2,8	2,5	2,81	0
-17,5	-42,5	2,16	2,12	1,44	2,68	2,6	2,69	2,6	-0,01
-17,5	-40	1,9	2,27	1,87	2,72	3,32	2,71	3,31	0,01
-17,5	-37,5	2,97	5,93	1,12	3,17	6,2	3,29	6,42	-0,21
-17,5	-35	3,77	6,87	0,84	3,38	6,46	3,83	7,22	-0,73
-17,5	-32,5	4,06	7,16	0,78	3,5	6,62	4,06	7,57	-0,91
-20	-50	1,73	1,99	1,74	2,37	2,89	2,36	2,88	0,01
-20	-47,5	1,65	1,81	1,76	2,28	2,69	2,28	2,69	0
-20	-45	1,67	1,73	1,9	2,4	2,68	2,37	2,66	0,02
-20	-42,5	2,24	1,81	1,28	2,59	2,07	2,6	2,08	-0,01
-20	-40	2,78	5,22	0,99	2,77	5,2	2,87	5,37	-0,15
-20	-37,5	3,66	7,21	0,73	3,01	6,44	3,45	7,25	-0,76
-20	-35	3,8	7,22	0,71	3,08	6,42	3,59	7,34	-0,87
-20	-32,5	3,78	7,16	0,71	3,06	6,36	3,56	7,25	-0,83