

## Impactos das Mudanças Climáticas na disponibilidade futura do recurso eólico

Rodrigo Santos Costa<sup>1</sup>  
Graziela Luzia da Costa<sup>2</sup>  
Francisco José Lopes de Lima<sup>1</sup>  
André Rodrigues Gonçalves<sup>1</sup>  
Fernando Ramos Martins<sup>3</sup>  
Enio Bueno Pereira<sup>1</sup>  
Madeleine Sánchez Gácita Casagrande<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE

<sup>2</sup>Technical University of Denmark – DTU

<sup>3</sup>Universidade Federal do Estado de São Paulo – UNIFESP

### RESUMO

Diversos estudos indicam que um processo de descarbonização mundial é mandatório para que os efeitos da mudança do clima sejam minimizados. O Brasil, de fato, possui relevante disponibilidade do recurso eólico e este tem sido inserido gradativamente na matriz elétrica nacional. Se considerarmos os efeitos das mudanças do clima, esta inserção demanda o entendimento do comportamento temporal e espacial em horizontes futuros, tomando como base a disponibilidade atual. Este trabalho pretende avaliar estes possíveis impactos através da análise das simulações do modelo Eta-HadGEM2-ES. O modelo climático foi corrigido a partir de uma base de dados de reanálises corrigidas, onde o viés identificado no período histórico foi utilizado como referência para a correção das projeções. Foram observadas mudanças relevantes nos padrões sazonais do recurso, como antecipações dos valores máximos e mesmo na intensidade do vento ao longo do País. A alteração no ciclo sazonal, com antecipação em dois meses dos máximos mensais, além de um ganho de até 20% no potencial eólico ao longo do ano, com exceção para o verão são os resultados mais relevantes a se considerar para o Nordeste.

**Palavras-chave:** mudanças climáticas, recurso eólico, planejamento energético

### ABSTRACT

Several studies indicate that a worldwide decarbonization process is mandatory in order to minimize the effects of climate change. Brazil, in fact, has significant availability of the

wind resource and it has been gradually inserted into the national electric matrix. If we consider the effects of climate change, this insertion requires an understanding of temporal and spatial behavior in future horizons, based on current availability. This work intends to evaluate these possible impacts, analyzing the simulations of the Eta-HadGEM2-ES model. A bias removal was applied in the climate model, where the bias from historical period was used as a reference for correcting the projections. Relevant changes were observed in the seasonal patterns of the resource. Wind potential has increased during the year, except for summer, are the most relevant results to be considered for the Northeast region.

**Keywords:** climate change, wind energy, energy planning

## 1. INTRODUÇÃO

Diversos estudos indicam que um processo de descarbonização mundial é mandatório para que os efeitos da mudança do clima sejam minimizados. O Brasil, de fato, possui relevante disponibilidade do recurso eólico e este recurso primariamente renovável tem sido inserido gradativamente na matriz elétrica nacional. Segundo o Plano Decenal de Expansão da Energia (MME/EPE, 2019), espera-se que em 2029 a fonte eólica represente 16% de um total instalado de 251 GW. Se considerarmos os efeitos das mudanças do clima, este crescimento demanda o entendimento do comportamento temporal e espacial em horizontes futuros, em relação a disponibilidade atual.

Este trabalho pretende avaliar estes possíveis impactos através da análise das simulações do modelo Eta-HadGEM2-ES. Visando minimizar os já conhecidos erros dos modelos climáticos, serão implementadas correções estatísticas nos resultados das simulações, a partir da verificação do viés do período histórico do modelo em relação a uma base de dados de reanálises corrigidas com dados de superfície.

Diferentemente de outros continentes, sobre os quais pode-se encontrar trabalhos recentes focados na análise de possíveis impactos futuros das mudanças climáticas na disponibilidade do recurso eólico, a América do Sul em geral e o Brasil possuem trabalhos escassos abordando este tema. Nos últimos 10 anos, os estudos que utilizam modelagem climática para projetar cenários avançaram em complexidade e confiabilidade, na medida em que as ferramentas evoluem e novas técnicas de refinamento de grade e correção de vieses vão sendo incorporadas.

Pryor *et al.* (2005) usaram um método de downscaling a partir de cinco Modelos de Circulação Geral - GCMs e 46 estações no Norte da Europa e apontaram uma diminuição da velocidade média e na densidade do vento para as projeções climáticas entre 2080-2100. Sailor *et al.* (2000) realizaram um estudo sobre os efeitos das Mudanças Climáticas no vento em superfície para o Nordeste dos Estados Unidos utilizando métodos de downscaling das projeções climáticas futuras de quatro GCMs (GISS, MPI, GFDL, MRI) para os cenários de emissões do IPCC, SRES A1B e A2. O trabalho indica uma diminuição de 40% no recurso eólico para ambos os cenários nos períodos de primavera e verão. Ainda, segundo os autores, os resultados dos GCMs apresentam ligeiras diferenças no potencial eólico e tornam-se ainda menores após a regionalização das séries temporais.

No Brasil, Lucena *et al.* (2010) produziram projeções para a velocidade do vento com resolução de 50 km e em dois cenários de emissão de CO<sub>2</sub> (A2 e B2), utilizando o modelo regional PRECIS do CPTEC/INPE aninhado ao modelo de circulação geral HadCM3 com a técnica de downscaling. Os autores encontraram evidência de um aumento no potencial de geração eólica no Brasil devido às mudanças climáticas globais de até 20%, principalmente para a região Nordeste (NEB) e uma redução significativa em uma área localizada no oeste da Amazônia. Eles também chamam a atenção ao fato de que os resultados dependem da qualidade do único modelo utilizado e considerando a grande dispersão entre diferentes modelos de circulação geral, os resultados do trabalho carregam grande incerteza. Buscando refinar um pouco mais estes resultados, Pereira *et al.* (2013) produziu projeções climáticas com o modelo de mesoescala Eta/CPTEC aninhado ao modelo de circulação geral HadCM3, gerando séries de 40 km de resolução horizontal e 6h de resolução temporal. As projeções para o cenário A1B mostraram uma tendência de em média 15%-30% de aumento para a maior parte da região Nordeste, com algumas regiões com intensificação de mais de 100%, principalmente ao norte desta região. A estação do outono foi a que apresentou a maior tendência de aumento com relação ao período baseline. Para a região Sul, o modelo mostrou uma tendência de aumento um pouco menos expressiva, com picos de 20% em algumas áreas.

A medida que a precipitação na região Nordeste é suscetível às mudanças climáticas, prevê-se que a energia eólica possa substituir a disponibilidade hidrelétrica perdida (De Jong *et al.*, 2017). Entre os anos de 2000 e 2015, a produção de energia

eólica aumentou de 19MW para 12,2GW (PES et al, 2017). Uma vez que o vento é uma fonte de energia intermitente, fortemente determinada pelas condições climáticas, efeitos importantes na geração de energia eólica podem ser esperados a médio e longo prazo, em particular relacionados aos impactos dos ventos extremos (PES *et al.*, 2017).

Reboita *et al.* (2018) projetou mudanças na intensidade do vento e na densidade de potência para 100 m de altura na América do Sul e oceanos adjacentes, por meio de técnicas de redução de escala e ensemble, aninhando o modelo climático regional versão 4 (RegCM4) a partir das saídas dos modelos climáticos globais MPI-ESM-MR, GFDL-ESM2-M e HadGEM2-ES, considerando o cenário RCP8.5. O conjunto RegCM4 no clima atual (1979–2005) foi validado através de comparações com as reanálises do ERA-Interim e representam bem os padrões espaciais do vento, com algumas diferenças em relação à intensidade, principalmente no centro-leste do Brasil e na Patagônia. A comparação entre o clima futuro (2020-2050 e 2070-2098) e o atual mostra que há um aumento na intensidade do vento e na densidade de potência no norte da América do Sul, centro-leste do Brasil (exceto no verão) e latitudes superiores a 50° S. Esse aumento é mais intenso no período 2070-2098.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Base de dados observacionais consolidada

Visando o desenvolvimento de uma base de dados que fosse consolidada como uma combinação entre reanálises corrigidas e dados medidos em superfície, foi realizado um custoso processamento computacional para a criação da base climatológica combinada. De maneira resumida, este processo se deu da seguinte maneira:

- I) montagem uma base de dados observados (dados medidos in situ e dados de METAR), dos anos de 2016 e 2017;
- II) baseado nos dados observados, determinação da distribuição mensal das frequências da velocidade do vento para diferentes pontos espalhados pelo território brasileiro;
- III) utilização de três fontes de dados de reanálises (MERRA-2, do National Aeronautics and Space Administration - NASA; ERA5, do European Centre for Medium-Range Weather Forecasts - ECMWF; e CFSR, do National Center for Environmental Prediction - NCEP) do mesmo período que a base de dados observados para

estabelecer um modelo de regressão linear múltipla (RLM) a partir da combinação das três reanálises, do qual sairão os coeficientes de determinação para a “construção” da Reanálise Combinada a partir da climatologia das reanálises;

IV) geração das bases climatológicas de reanálises (MERRA-2, ERA5 e CFSR), com dados horários em período que esteja de acordo com o período histórico e resolução espacial do modelo climático e;

V) combinação das reanálises utilizando o modelo gerado pela RLM para obter o produto final.

A avaliação da base combinada mostrou que esta reproduz os dados observados para os pontos medidos, com correlações mínimas de 0,72 para o fator de escala e de 0,77 para o fator de forma, sendo que na maioria dos meses os valores de correlações situam-se entre 0,85 e 0,95 (não mostrado).

## 2.2 Correção do viés do modelo climático

Os modelos numéricos possuem um notório viés na simulação da velocidade do vento, causados pelas suas simplificações, pelas parametrizações dos processos atmosféricos e das suas condições iniciais. Estas limitações resultam em erros sistemáticos mais altos que as incertezas de velocidade de vento observados em estações meteorológicas. Aceitadas estas deficiências, verifica-se a real motivação para a realização desta etapa do trabalho, uma vez que refinamentos e a obtenção de simulações com menores erros são necessários para diversas aplicações.

Os dados de velocidade de vento do modelo Eta-HadGEM2-ES foram corrigidos com base nos parâmetros da distribuição de Weibull. Ou seja, foi extraída uma série do modelo em cada ponto de grade e com isso foram calculados os parâmetros  $c$  e  $k$  dos dados simulados e da base de Reanálise Combinada. As diferenças entre os dados foram convertidas em percentual e a partir deste momento, foram gerados mapas de correção, sendo estes aplicados na base de dados do período histórico. Uma vez que o método foi validado, ele foi aplicado para o período futuro, nos dados de projeções climáticas.

A fim de ajustar adequadamente as saídas do Eta-HadGEM2-ES, assegurando variabilidades horária, diária e interanual de maneira realista, foram implementadas as correções descritas – que são na realidade uma abordagem baseada na correção de uma CDF, onde corrige-se a frequência do vento. Como resultado desse processo, há

a tendência em reduzir significativamente o erro sistemático inerente no modelo. Assim como com todas as abordagens de downscaling estatístico, supõe-se que o viés em relação as simulações históricas serão constantes no período futuro da projeção (THRASHER *et al.*, 2012).

### 3. RESULTADOS

Aqui são apresentados os resultados das projeções Eta-HadGEM2-ES para em dois cenários de emissão de CO<sub>2</sub> (RCP4.5 e RCP8.5). Todos os dados, sejam do período histórico ou de projeções tiveram aplicadas técnicas de erros sistemáticos, de acordo com a metodologia apresentada e para facilitar a compreensão, será utilizada a nomenclatura referente aos períodos futuros - “futuro próximo” (2006-2040), “meio do século” (2040-2070) e “final do século” (2070-2099). A Figura 1 apresenta o período histórico a irradiação global.

A Figura 1 apresenta a distribuição espacial do fator de escala  $c$  e de forma  $k$  de Weibull para o período histórico. É possível perceber que a costa e o interior do NEB apresentam sempre os maiores valores de  $c$  ao longo do ano, especialmente nos meses de julho e outubro, acompanhando a intensificação dos alísios (em agosto-setembro). A região amazônica apresenta os menores valores da escala para o ano inteiro e nas demais regiões não se percebe uma variação significativa, exceto pela costa sul-sudeste, que exibe um mínimo em julho.

Valores de fator de forma  $k$  de Weibull maiores que 3 podem ser encontrados na costa e interior do NEB ao longo do ano, indicando na média ventos relativamente constantes na região. Valores mais elevados de  $k$  são percebidos no período de julho a outubro, pelo mesmo motivo já mencionado - a intensificação e a predominância dos ventos alísios - aliado ao afastamento da Zona de Convergência Intertropical para latitudes mais ao norte nesta época, reduzindo sua influência na diminuição dos ventos da região.

A Figura 2 apresenta o pico do valor  $c$  ao longo do ano no período histórico e sintetiza as informações do período (mês do ano) em que o parâmetro de escala  $c$  é máximo junto da faixa de valores (em m/s) que cada ponto de grade apresenta através das cores e saturação da cor, respectivamente. Alterações no clima podem modificar o ciclo sazonal do vento no Brasil no futuro e a Figura 3 mostra o pico do fator de escala

nas projeções (mês do ano), simulados para os cenários RCP4.5 e RCP8.5 com o modelo Eta-HadGEM2ES.

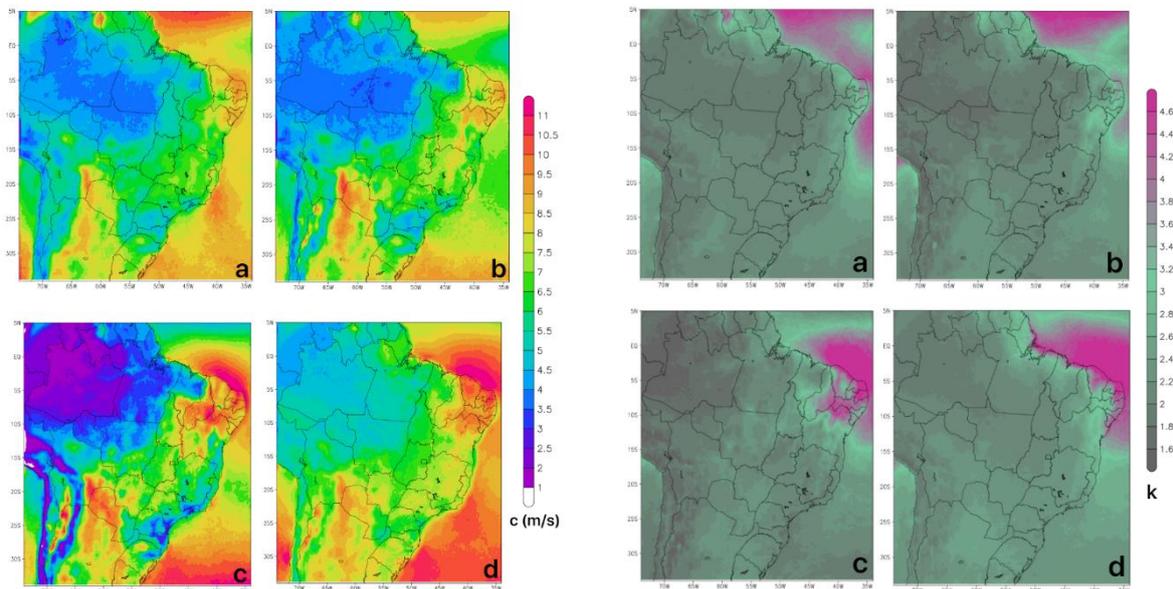


Figura 1 – Fator de escala  $c$  (esquerda) e fator de forma  $k$  (direita) para os meses de janeiro (a), abril (b), julho (c) e outubro (d), do período histórico.

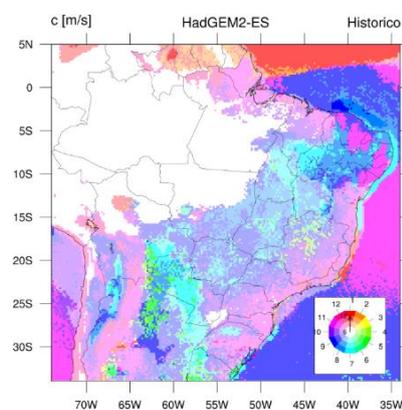


Figura 2 – Pico do fator de escala  $c$  para o período histórico, com valor de velocidade do vento (m/s).

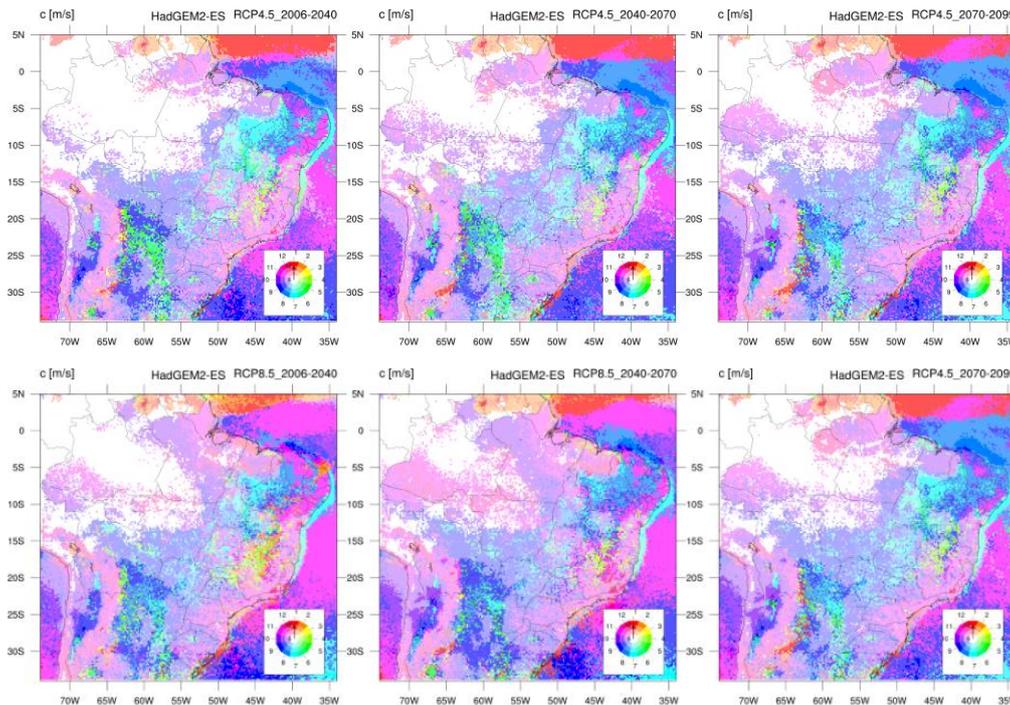


Figura 3 – Projeções de pico do fator de escala  $c$  para o futuro próximo (2006-2040), meio do século (2040-2070) e final do século (2070-2099) para os cenários RCP4.5 (linha superior) e RCP8.5 (linha inferior) pelo modelo Eta-HadGEM2ES.

A tendência geral de que o mês com o valor máximo para o  $c$  pertencer ao segundo semestre do ano para a maior parte do Brasil se mantém. O modelo projeta ao longo do próximo século que o pico do parâmetro de escala  $c$  ocorre de 30 a 60 dias (julho e agosto) antes do observado no período histórico setembro e novembro), em especial no NEB. O cenário RCP8.5 confirma a tendência de alteração do ciclo sazonal.

As Figuras 4 e 5 apresentam as projeções do cenário RCP4.5 dos parâmetros  $c$  e  $k$  de Weibull, respectivamente. Já as Figuras 6 e 7 apresentam a variação do parâmetro de escala  $c$  e de forma  $k$  ao longo dos três períodos, em relação ao período histórico (1979-2005), para o mesmo RCP4.5.

O modelo indica uma redução no parâmetro de escala  $c$  (Figura 6) sobre o Nordeste no mês de janeiro, com aumento progressivo nos períodos futuros. Projeta ainda um aumento de 20% do parâmetro  $c$  entre o estado de São Paulo (SP) e o Paraná (PR), ainda no início do século. Também há um aumento de 20% no parâmetro  $c$  sobre a porção norte da Amazônia, partindo do Centro-Oeste até a Amazônia Ocidental. Em abril, o aumento fica próximo a 20% sobre algumas localidades no norte do país. Já os meses de julho e outubro se assemelham ao mês de abril.

A análise da Figura 7 mostra que de um modo geral, a evolução observada para o mês de janeiro no parâmetro de forma  $k$  acompanha aquela já observada quando na análise do parâmetro  $c$ , onde são previstas reduções de 20% a 30% (com regiões onde os valores apresentam uma redução de até 40%) para a costa norte do Nordeste. O Eta-HadGEM2-ES prevê um aumento de até 20% no parâmetro de forma de Weibull no futuro próximo e final do século. Para o mês de abril, há o indicativo de aumento de 10 a 20% sobre a Amazônia Oriental e também sobre o interior do NEB. Para julho é previsto um aumento de 10 a 30% sobre o interior do NEB para o futuro próximo; também é previsto um aumento de 10 a 30% (com valores localizados de mais de 40%) sobre o estado do Maranhão e leste do Pará (PA), além de uma redução de 10 a 20% no oeste do mesmo estado. Os resultados observados para o mês de outubro apresentam reduções e aumentos dispersos. Destaca-se, entretanto, o aumento entre 10 a 20% dos valores observados nas simulações realizadas com o modelo Eta-HadGEM2-ES para os três períodos, em uma área que vai do interior do NEB até a região Sudeste do País.

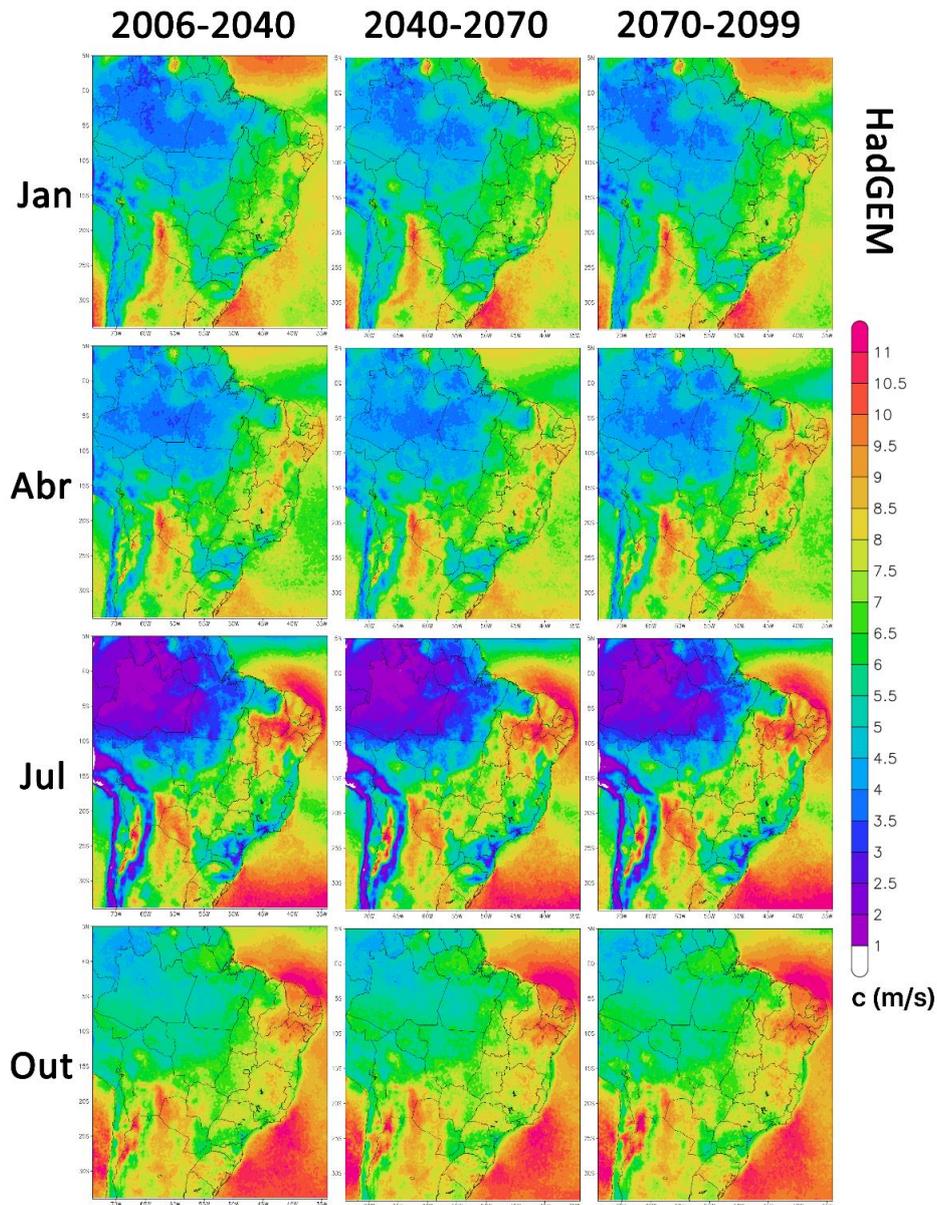


Figura 4 – Projeções para a fator de escala c de Weibull realizadas pelo modelo climático Eta-HadGEM2-ES.

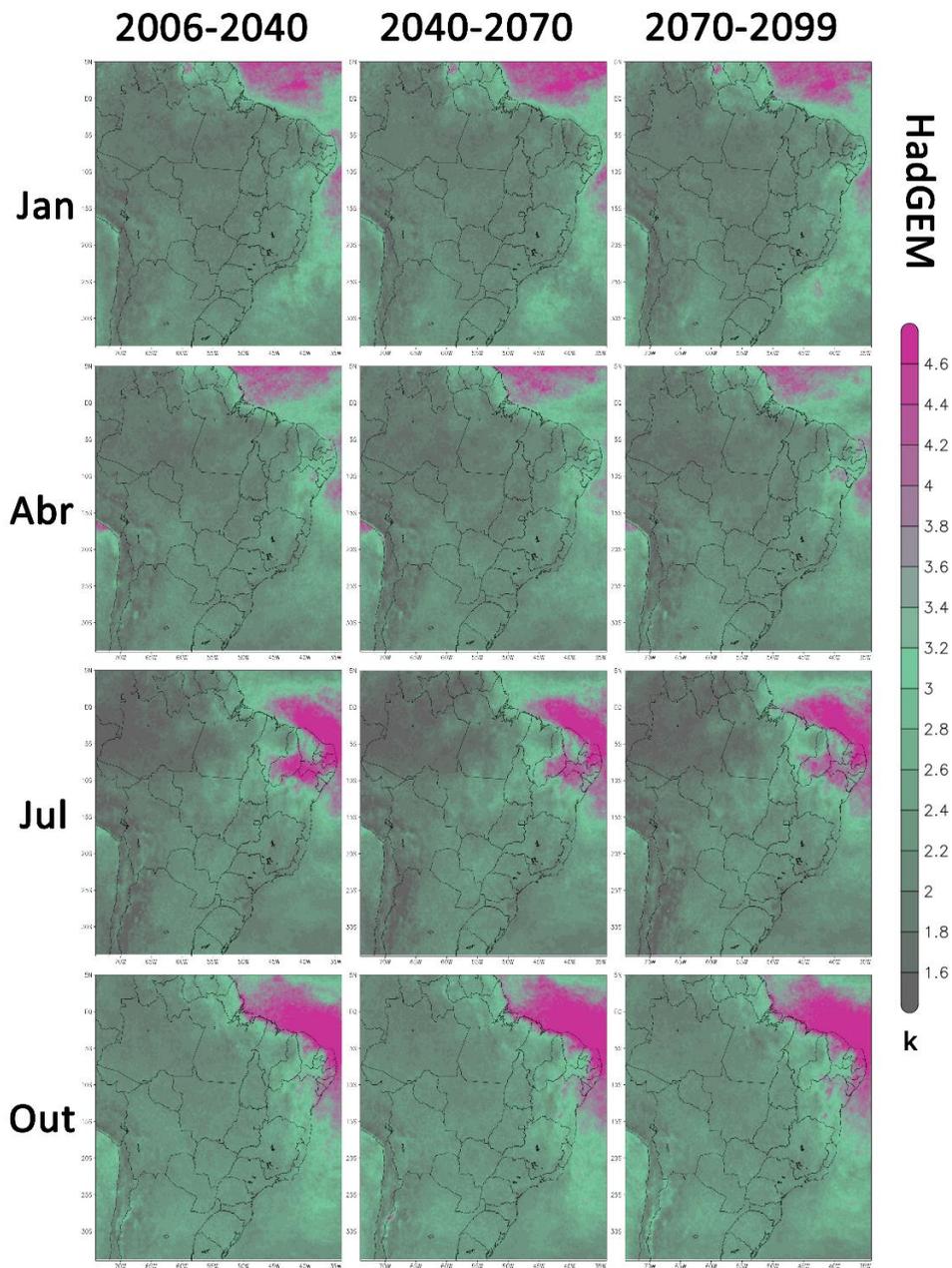


Figura 5 – Projeções para a fator de forma k de Weibull realizadas pelo modelo climático Eta-HadGEM2-ES.

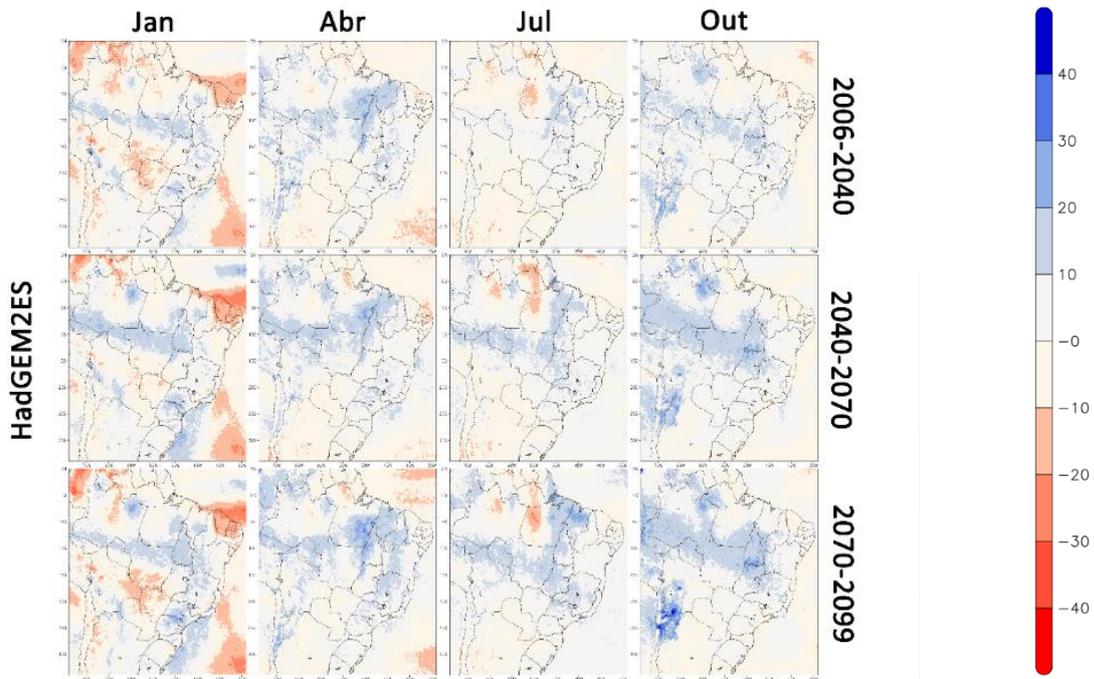


Figura 6 – Variação do fator de escala c (m/s) em comparação ao período histórico.

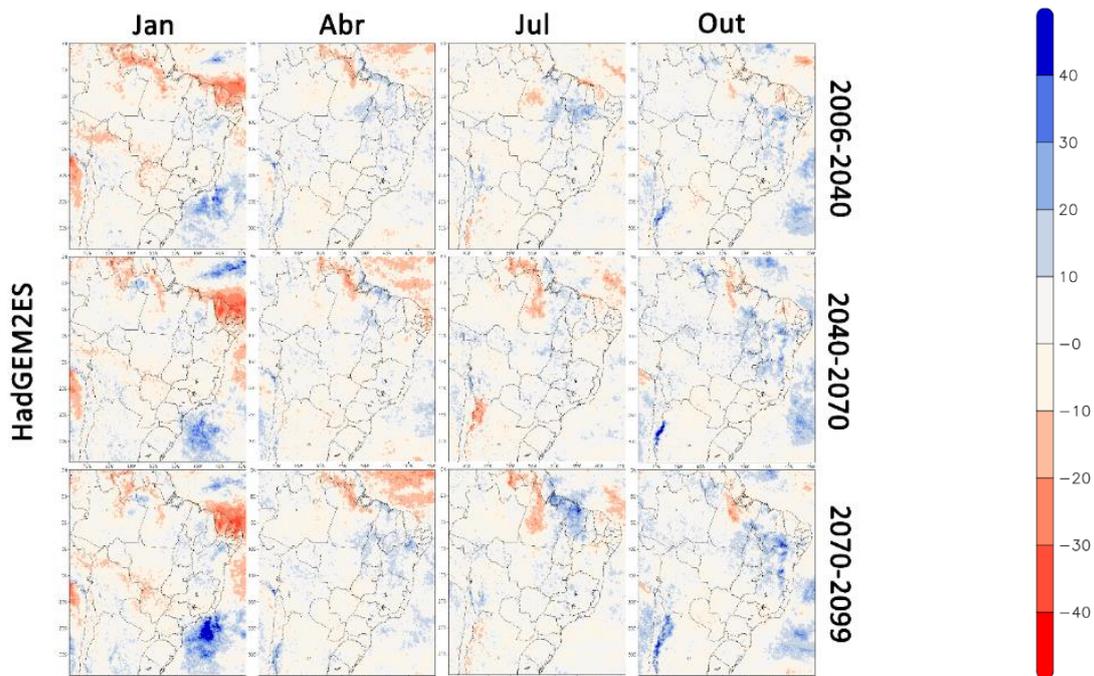


Figura 7 – Variação do fator de forma k em comparação ao período histórico.

#### 4. CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho era avaliar o potencial eólico futuro, considerando os diferentes cenários associados às mudanças climáticas. Isto foi realizado através da análise das simulações do Eta-HadGEM2-ES - onde seus resultados foram ajustados a partir de uma metodologia robusta e bastante complexa. Foram observadas mudanças relevantes nos padrões sazonais do recurso, como antecipações dos valores máximos e mesmo na intensidade do vento ao longo do País. A alteração no ciclo sazonal, com antecipação em dois meses dos máximos mensais, além de um ganho de até 20% no potencial eólico ao longo do ano, com exceção para o verão são os resultados mais relevantes a se considerar para o Nordeste.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao suporte financeiro da Petrobras, através dos Projetos ANEEL PD-00553-0034/2016 e PD-00553-0042/2016. Agradecem também ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia para Mudanças Climáticas (INCT-MC), através dos processos CNPq 573797/2008-0 e FAPESP 2008/57719-9.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DE JONG, P. *et al.* *Forecasting high proportions of wind energy supplying the Brazilian Northeast electricity grid.* Applied Energy, v. 195, p. 538–555, 2017.

MME/EPE. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2029* / Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2019.

PEREIRA DE LUCENA, A. F. *et al.* *The vulnerability of wind power to climate change in Brazil.* Renewable Energy, v. 35, n. 5, p. 904–912, 2010.

PEREIRA, E. B. *et al.* *The impacts of global climate changes on the wind power density in Brazil.* Renewable Energy, v. 49, p. 107–110, 2013.

PEREIRA, E. B. *et al.* *Atlas Brasileiro de Energia Solar.* 2ª edição. ed. São José dos Campos: LABREN/CCST/INPE, 2017.

PRYOR, S. C.; BARTHELMIE, R. J.; KJELLSTRÖM, E. *Potential climate change impact on wind energy resources in northern Europe: Analyses using a regional climate model.* Climate Dynamics, v. 25, n. 7–8, p. 815–835, 2005.

REBOITA, M. S.; AMARO, T. R.; DE SOUZA, M. R. *Winds: intensity and power density simulated by RegCM4 over South America in present and future climate.* Climate Dynamics, v. 51, n. 1–2, p. 187–205, 2018.



THRASHER, B. *et al.* *Technical Note: Bias correcting climate model simulated daily temperature extremes with quantile mapping.* Hydrology and Earth System Sciences, 2012.