



DESENVOLVIMENTO DE SERVIÇOS CLIMÁTICOS PARA RECURSOS SOLAR E EÓLICO PARA DIVERSAS ESCALAS E PÓSSIVEIS IMPACTOS DE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS

Relatório 3/5 - Quantificação da Disponibilidade Futura do
Recurso Eólico no Brasil – Análises e Resultados Preliminares

Graziela Luzia

Elaborado por: **Graziela Luzia**

Essa publicação foi realizada por uma equipe formada por consultores independentes sob a coordenação da Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável, por meio do projeto Ampliação dos Serviços Climáticos para Investimentos em Infraestrutura (CSI).

Este projeto foi pactuado no âmbito da Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável, por meio da parceria entre o Ministério do Meio Ambiente do Brasil e a Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ), no âmbito da Iniciativa Internacional para o Clima (IKI, sigla em alemão), do Ministério Federal do Meio Ambiente, Proteção da Natureza e Segurança Nuclear (BMU, sigla em alemão).

Participaram desse processo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), a Empresa Eletrosul/ Eletrobrás e a Defesa Civil de Santa Catarina.

Todas as opiniões aqui expressas são de inteira responsabilidade dos autores, não refletindo necessariamente a posição da GIZ e do MMA. Este documento não foi submetido à revisão editorial.

EQUIPE TÉCNICA - MMA

Hugo do Valle Mendes (coordenação)
Adriana Brito da Silva
Jaqueline Leal Madruga

EQUIPE TÉCNICA - GIZ

Ana Carolina Câmara (coordenação)
Eduarda Silva Rodrigues de Freitas
Pablo Borges de Amorim

EQUIPE TÉCNICA - EPE

Angela Livino
Jeferson Soares
Gustavo Brandão
Haydt de Souza

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

André Rodrigues Gonçalves
Rodrigo Costa

Ministério do Meio Ambiente

Esplanada dos Ministérios, Bloco B, Brasília/DF, CEP
70068-901
Telefone: + 55
61 2028-1206

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Sede da GIZ: Bonn e Eschborn
GIZ Agência Brasília
SCN Quadra 01 Bloco C Sala 1501
Ed. Brasília Trade Center - 70.711-902 Brasília/DF
T + 55-61-2101-2170
E giz-brasilien@giz.de
www.giz.de/brasil

A encargo de:

Ministério Federal do Ambiente, Proteção da Natureza e Segurança Nuclear (BMU) da Alemanha

BMU Bonn:

Robert-Schuman-Platz 3
53175 Bonn, Alemanha
T +49 (0) 228 99 305-0

Diretora de Projeto:

Ana Carolina Câmara

T +55 61 9 99 89 71 71

T +55 61 2101 2098

E ana-carolina.camara@giz.de



Sumário

1. Introdução	2
2. Descrição do Produto	4
3. Metodologia	6
3.1 Constituição da base EPE/METAR	6
3.2 Determinação da distribuição mensal das frequências de velocidade de vento observada	9
3.3 Determinação dos coeficientes para a combinação das reanálises a partir do modelo de regressão linear	12
3.4 Composição da base climatológica de reanálises	17
3.4.1 MERRA-2	18
3.4.2 ERA5	18
3.4.3 CFSR	19
3.4.4 Preparação dos dados climatológicos para aplicar o modelo da regressão linear	20
3.5 Aplicação do modelo de RLM para construção da Reanálise Combinada	22
4. Resultados	23
5. Considerações Finais	36
6. Referências Bibliográficas	37
ANEXO 1: Fator de escala. OBS x Reanálises e modelo de regressão linear	38
ANEXO 2: Fator de forma. OBS x Reanálises e modelo de regressão linear	40
ANEXO 3: Erro de previsão – Fator de escala	42
ANEXO 4 - Erro de previsão – Fator de forma	46

1. Introdução

O seguinte documento apresenta o relatório da elaboração do Produto 3, “Quantificação da disponibilidade futura do recurso eólico no Brasil – análises e resultados preliminares”, fruto da consultoria contratada pela Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável (GIZ) no Brasil no âmbito do projeto “Ampliação dos Serviços Climáticos em Investimentos de Infraestrutura” (CSI), subprojeto “Desenvolvimento de serviços climáticos para recursos solar e eólico para diversas escalas e possíveis impactos de alterações climáticas”.

Como dependentes das condições de tempo, muitos componentes do sistema energético deverão sofrer mudanças como resposta às futuras alterações no clima. Estes sistemas poderão ser afetados por variações, como por exemplo, na circulação atmosférica, que pode acabar afetando os recursos solar e eólico e suas variabilidades, bem como a probabilidade da ocorrência de eventos extremos. Estes impactos irão, provavelmente, ajudar e/ou atrapalhar os esforços de mitigação e adaptação e por isto é muito importante que eles sejam bem compreendidos e incorporados nos modelos.

Apesar de atualmente os modelos apresentarem um progresso considerável na representação da circulação atmosférica, tanto global quanto regional, todos eles são afetados com vieses em um grau que inviabiliza seu uso direto, sem um ajuste, especialmente em estudos de mudanças climáticas (EHRET *et al.*, 2012). Para superar este problema, correção de vieses das saídas dos modelos ajustada por observações é um procedimento padrão nestes estudos. Para este propósito, a utilização de dados de reanálises, sobretudo em estudos de energia eólica, pode ser altamente vantajosa.

Reanálise é o nome dado ao produto que passou por um sistema de assimilação de dados que fornece um reprocessamento de observações meteorológicas, tipicamente abrangendo uma extensa sequência de registros de dados. O processo depende de uma previsão de um modelo, combinando observações de diferentes fontes (satélites, estações meteorológicas, radar, bóias, etc.) de uma maneira consistente, e permitindo a produção de conjuntos de dados em grade

para uma ampla gama de variáveis, algumas escassas ou não observadas diretamente (GELARO *et al.*, 2017). Modelagem da variável vento requer séries de alta resolução temporal e espacial. Estes dados nem sempre são fáceis de se obter e reanálises têm se tornado bastante populares em estudos de recursos energéticos renováveis devido a sua conveniência e cobertura global (STAFFELL e PFENNINGER, 2016). Entretanto, apesar da conveniência, como qualquer dado de modelo, as reanálises estão também sujeitas a vieses. Stafell e Pfenninger (2016) chamam a atenção para os limites da confiança que os resultados de um estudo que utilize dados de reanálise sem uma validação ou ajuste apropriado podem ter.

Para este produto foi solicitado a elaboração de uma base de dados que possibilite quantificar a disponibilidade futura do recurso eólico no Brasil. O que se propôs foi, não a escolha de uma, mas a combinação do que se tem de melhor entre os produtos de reanálises oferecidos pelos centros de pesquisa. E em se tratando de correção e da combinação dos dados, optou-se por uma abordagem de inferência frequencista a partir de um modelo de regressão linear, buscando-se o melhor resultado com um método simples.

O produto 3 é, portanto, uma robusta avaliação das incertezas associadas às estimativas produzidas pelos modelos numéricos de clima que serão utilizados na geração de dados dos próximos produtos da consultoria. Através dele é que serão feitos os ajustes necessários para uma correta interpretação da análise de tendências, associadas às possíveis alterações no recurso eólico em decorrência das mudanças climáticas futuras. Levando-se em conta que dados meteorológicos, como reanálises, são amplamente disponibilizados, mas que requerem tempo e conhecimento significativos para se obter, entender, processar, corrigir e utilizar de forma apropriada, a base de dados é fruto de um extensivo e sistemático trabalho de correção e combinação de reanálises de três fontes diferentes, a saber: Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications (MERRA-2), European Centre for Medium-Range Weather Forecast Re-Analysis (ERA5) e Climate Forecast System Reanalysis (CFSR), que conferem à base a junção do estado da arte das reanálises com o melhor tratamento de dados

possível dado os recursos disponíveis. Maiores detalhes sobre a correção dos dados podem ser vistos a seguir.

O objetivo deste relatório é fornecer ao Produto 3 todas as informações necessárias, desde a origem dos dados, as incertezas e a metodologia utilizada para seu desenvolvimento até as especificações finais do produto. De forma geral, o produto consta de uma base consolidada de dados, em frequência mensal, dos parâmetros de forma e escala da distribuição de Weibull da velocidade do vento para todo o território brasileiro, e dos mapas incluídos nos resultados deste relatório.

A seção 2 apresenta a descrição do produto; a seção 3 descreve a metodologia utilizada para a elaboração do produto em todas as suas fases, enquanto a seção 4 apresenta os resultados. As considerações finais são apresentadas na seção 5.

2. Descrição do Produto

No âmbito do subprojeto CSI/GIZ "Desenvolvimento de serviços climáticos para recursos solar e eólico para diversas escalas e possíveis impactos de alterações climáticas", objeto de estudo desta consultoria, são necessários dados observacionais de boa qualidade que subsidiem a análise da disponibilidade futura dos recursos energéticos renováveis no Brasil. O estudo dos possíveis impactos nos recursos energéticos renováveis, tema dos produtos 4 e 5 previstos para o final desta consultoria, se dará através da utilização de simulações climáticas, comparando projeções futuras de vento e irradiação solar com resultados obtidos para o período histórico. Embora esta consultoria contemple estudos sobre os recursos solar e eólico, o produto 3, tema deste relatório, refere-se apenas ao recurso eólico.

Simulações de mudanças climáticas baseadas em modelos climáticos inevitavelmente carregam incertezas. Para diminuir substancialmente estas incertezas, é fundamental que o período histórico das simulações seja validado utilizando-se bases de dados observacionais consolidadas. De acordo com o Termo de Referência desta consultoria, para o produto 3 é solicitado o desenvolvimento de:

“Base de dados observacionais, consolidada em escala mensal a partir da combinação de conjuntos de reanálises e medições de superfície, contendo a distribuição de frequência da variável velocidade do vento gerada a partir dos dados em resolução original (horária, se possível) e em resolução espacial compatível com as saídas dos modelos climáticos refinados.”

A principal justificativa para este produto é que estes dados são importantes para se avaliar e compreender as incertezas associadas às estimativas produzidas pelos modelos numéricos de clima que serão utilizados na geração de dados e produtos da consultoria.

As informações a seguir tratam das especificações do produto 3.

Tabela 1: Metadados do produto 3.

METADADOS PARA Rcomb.nc e Rcomb.xlsx	
Nome do dado	Reanálise Combinada
Título	Produto 3 - Base de Dados Consolidada
Origem	LABREN (Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia)
Descrição	Climatologia mensal da distribuição das frequências de velocidade de vento a 100 metros para todo o território brasileiro
Parâmetros	“c” [m/s] e “k” [adimensional]
Frequência	mensal
Resolução espacial	0,2° lat x 0,2° lon; 201 pontos em x / 196 pontos em y
Dimensões da grade	-74W , -34W ; -34S , 5N
Formato	xlsx e netcdf
Consultora responsável	Graziela Luzia graziela.luzia@inpe.br

3. Metodologia

O desenvolvimento do produto 3 exigiu um processo sistemático de verificação passo a passo, além de demandar um alto custo computacional no processamento de dados de alta resolução espacial e temporal, que são imprescindíveis ao produto. Esta seção visa descrever todo o processo de desenvolvimento do produto, a origem dos dados utilizados e as incertezas envolvidas.

Resumidamente, a metodologia guiou-se na estratégia a seguir:

- I) Montar uma base de dados observados (medidos *in situ*);
- II) Baseado nos dados observados, determinar a distribuição mensal das frequências da velocidade do vento para diferentes pontos espalhados pelo território brasileiro;
- III) Utilizar dados de reanálises 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) Fazer download de dados horários de reanálises (MERRA-2, ERA5 e CFSR) e montar uma base de dados climatológica mensal em período que esteja de acordo com o período histórico e resolução espacial dos modelos climáticos que serão utilizados nos próximos produtos e;
- V) Combinar as reanálises utilizando o modelo gerado pela RLM para obter o produto final.

3.1 Constituição da base EPE/METAR

Para a base de dados observados (medidos *in situ*) buscou-se alternativas entre os dados disponíveis em bases públicas e que apresentassem boa qualidade, e cujas características combinassem com a necessidade do trabalho.

Inicialmente foram fornecidos pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) dados observados de alta qualidade e na frequência compatível com a necessidade do trabalho. Estes dados são provenientes de medições em parques eólicos, porém foram descaracterizados (processados em médias e disponibilizados em pontos de grade previamente combinados com a consultoria) de modo que não violassem acordos de privacidade entre os proprietários originais dos dados e a EPE. Os dados compreendem o período de 2016 e 2017, estão em frequência mensal, e ocupam pontos em uma grade com resolução de $0,2^\circ \times 0,2^\circ$. No total, 25 pontos localizados principalmente sobre o Nordeste Brasileiro (exceto por um ponto no sul do Brasil) armazenam frequências de velocidade do vento distribuídas em classes (bins) de 1 em 1 m/s de 1 a 20 m/s.

De bases públicas esbarrou-se em obstáculos como dados com período incompatível com o necessário, bases de dados de qualidade não confiável, dados de qualidade possivelmente boa, mas que demandaria muito tempo e burocracia para se obter, etc.

A solução adotada para compor a base de dados observados foi obter dados METAR da REDEMETS, Rede de Meteorologia (<https://www.redemet.aer.mil.br/>) do Comando da Aeronáutica. O Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) exerce o papel de fornecer informações meteorológicas para a segurança das operações aéreas através de uma complexa estrutura de radares, estações meteorológicas e outros recursos instalados no país. Para facilitar o posterior trabalho de extrapolação do vento para 100 m, dentre as diversas estações meteorológicas localizadas em aeroportos, optou-se por selecionar apenas os aeroportos internacionais, pois, segundo a ICAO 105-15/2008 (<https://publicacoes.decea.gov.br/>), todos os aeródromos internacionais, que possuem estações meteorológicas do tipo EMS-2, possuem medidas de vento a 10 m do solo, enquanto os demais (EMS-3) foram padronizados somente a partir de 22/12/2016. A partir disto, o trabalho de verificação da qualidade dos dados das estações selecionadas passaria por mais um filtro. Dentre todas as estações, restaram apenas as que apresentaram dados disponíveis para as 24h e sem

interrupções durante o período de estudo, o que resultou em um total de 17 estações meteorológicas.

Os dados METAR têm a particularidade de estarem em unidade de nós (kt), que foram convertidos para m/s na medida de $1 \text{ kt} = 0,514 \text{ m/s}$, e então transformadas em bins de 1 m/s e calculadas as frequências a exemplo dos dados da EPE. A localização das estações METAR encontram-se na Tabela 2 e a distribuição final das estações da base de dados observados pode ser vista na Figura 1.

Tabela 2: Estações METAR

Estação	Código	Latitude	Longitude
Aeroporto Internacional de Manaus	SBEG	-3,03	-60,05
Aeroporto Internacional de Santarém	SBSN	-2,43	-54,72
Aeroporto Internacional de Boa Vista	SBBV	+2,83	-60,7
Aeroporto Internacional de Rio Branco	SBRB	-9,97	-67,8
Aeroporto Internacional de Porto Velho	SBPV	-8,77	-63,92
Aeroporto Internacional de Macapá	SBMQ	+0,03	-51,05
Aeroporto Internacional Marechal Rondon	SBCY	-15,65	-56,1
Aeroporto Internacional de Campo Grande	SBCG	-20,47	-54,67
Aeroporto Internacional de Brasília	SBBR	-15,87	-47,93
Aeroporto Internacional Tancredo Neves	SBCF	-19,62	-43,97
Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro	SBGL	-22,92	-43,17
Aeroporto Internacional de Viracopos	SBKP	-23,0	-47,13
Aeroporto Internacional de Guarulhos	SBGR	-23,62	-46,65
Aeroporto Internacional Cataratas	SBFI	-25,52	-54,58
Aeroporto Internacional Afonso Pena	SBCT	-23,52	-49,17
Aeroporto Internacional de Florianópolis	SBFL	-27,67	-48,55
Aeroporto Internacional Salgado Filho	SBPA	-30,0	-51,18

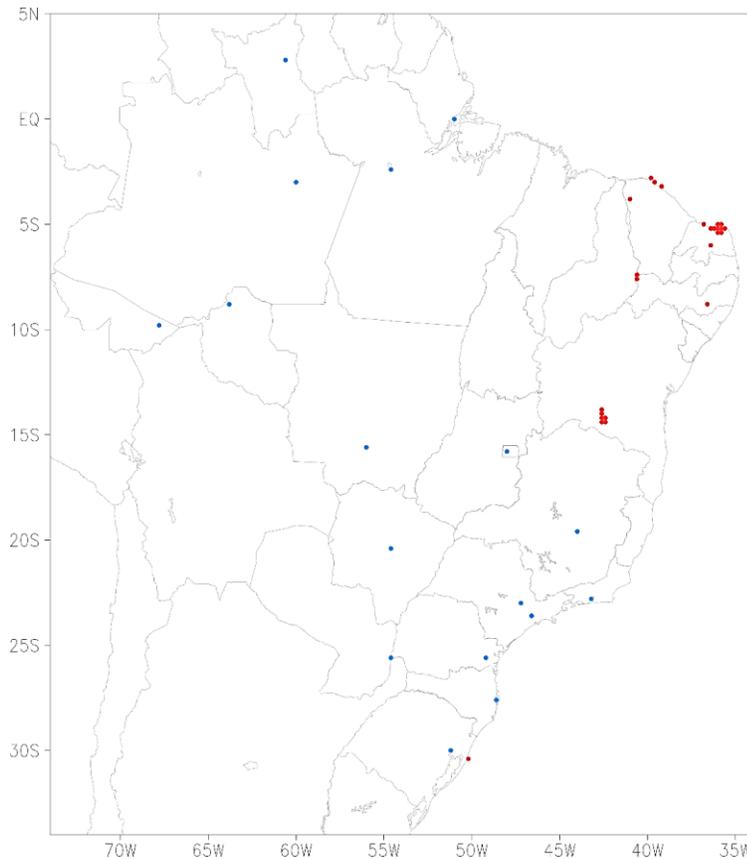


Figura 1: Base de dados observados EPE/METAR. Pontos azuis representam a localização das estações meteorológicas METAR e pontos vermelhos representam aproximadamente a localização das frequências fornecidas pela EPE.

3.2 Determinação da distribuição mensal das frequências de velocidade de vento observada

Neste trabalho optou-se por utilizar a biparamétrica função densidade de probabilidade de Weibull, comumente utilizada em estudos climatológicos do vento ou de energia eólica, para representar a distribuição de probabilidade da velocidade do vento. Ela é dada pela equação:

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad \text{Equação 1}$$

Onde, $f(v)$ é a função densidade de probabilidade (do inglês, Probability Density Function - PDF), k é o parâmetro ou fator adimensional de forma (relacionado a

curtose, ou seja ao achatamento da curva de distribuição), c é o parâmetro ou fator de escala (relacionado a média da distribuição, em m/s) e v é a observação da velocidade do vento na série temporal (também em m/s). A função densidade de probabilidade acumulada (do inglês, Cumulative Density Function - CDF) é dada por:

$$F(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad \text{Equação 2}$$

Existem disponíveis na literatura diversas maneiras de se obter os parâmetros de Weibull. Para este trabalho, utilizou-se um método gráfico (SEGURO e LAMBERT, 2000; AKDAG e DINLER, 2009), que consiste em linearizar as distribuições e então obter os parâmetros graficamente. A aplicação deste método exige que a velocidade do vento esteja na forma de CDF. Os dados observados da EPE foram disponibilizados em bins de valores crescentes, e os dados METAR foram processados para assumirem a mesma forma. A partir da Equação 2, a seguinte relação pode ser determinada:

$$\{\ln[-\ln(1 - F(v))]\} = k \ln(v) - k \ln(c) \quad \text{Equação 3}$$

Onde v representam os bins de velocidade. Então, o gráfico da Equação 3 versus $\ln(v)$ pode ser representado por uma linha reta de inclinação k e coeficiente linear $-k \ln(c)$. Esta transformação logarítmica é a base do método gráfico. A linha que melhor se ajusta pode ser determinada graficamente (Figura 2), do que provém o nome de "método gráfico". Entretanto, utilizou-se o algoritmo de ajuste automático "polyfit" no software Matlab, que utiliza regressão pelo método dos mínimos quadrados para determinar os parâmetros da equação que descreve a reta. Da reta do tipo $y = a \ln(v) + b$, são extraídos os parâmetros, onde:

$$k = a \quad \text{Equação 4}$$

$$c = e^{-\frac{b}{a}} \quad \text{Equação 5}$$

O método gráfico, apesar de comumente utilizado, é menos preciso do que outros métodos, como o de máxima verossimilhança, por exemplo (SEGURO e LAMBERT, 2000). Isto se deve a limitação do método não ter a regressão por mínimos quadrados aplicada sobre a série de dados de velocidade do vento em si, mas sobre a sua distribuição de frequência acumulada (CDF). Cada ponto é também pesado igualmente, ainda que alguns dos bins representem muito mais pontos do que os outros. Este problema pode ser minimizado quando se diminui o tamanho dos bins, entretanto, isto não foi possível devido ao formato do dado disponibilizado. A própria escolha do método foi devido aos dados disponibilizados pela EPE estarem originalmente em frequências e a transformação para linguagem de programação do método gráfico ser mais prática.

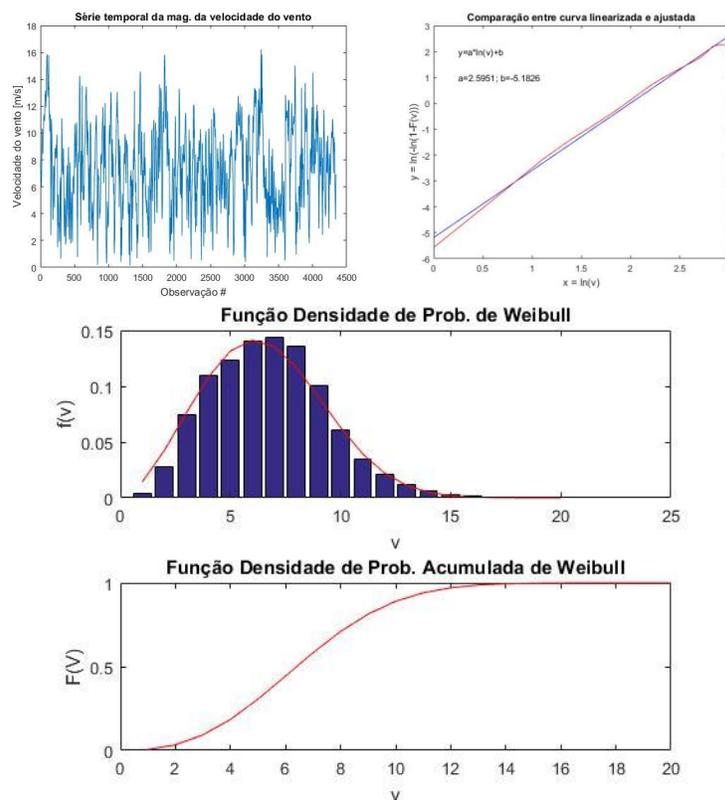


Figura 2: Gráficos representando a metodologia apresentada na subseção 3.2 para uma dada estação, um dado mês, uma dada série temporal. a) série temporal da magnitude da velocidade do vento representando o formato original de todos os dados utilizados no trabalho, exceto pelos dados da EPE, que não foram disponibilizados como valores de velocidades, mas sim como frequências relativas. b) comparação entre a curva linearizada pelo método gráfico e reta que melhor se ajusta a ela. Os parâmetros c e k são extraídos a partir dos coeficientes desta reta; c) histograma de uma distribuição de frequências de velocidades de vento e a respectiva PDF; d) CFD da mesma distribuição de frequências.

3.3 Determinação dos coeficientes para a combinação das reanálises a partir do modelo de regressão linear

Na seção 1 comentou-se sobre a vantagem em utilizar reanálises para formar uma base de dados observacionais. Nas próximas subseções, entretanto, serão apresentados os conjuntos de reanálises escolhidos para compor a base e detalhes da metodologia utilizada no processamento destes dados. Foram escolhidos três conjuntos de dados provenientes de diferentes centros, a saber: MERRA-2, do National Aeronautics and Space Administration (NASA), ERA5, do European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) e CFSR, do National Centers for Environmental Prediction (NCEP). Para esta etapa do trabalho, obteve-se dados do período relativo aos dados observados (base EPE/METAR), de 2016 a 2017. Maiores detalhes dos dados, na subseção 3.3.

A partir dos dados horários de vento, em diferentes alturas para cada reanálise, foram extraídas séries temporais da magnitude da velocidade do vento para cada um dos pontos definidos na base EPE/METAR. Estes dados foram extrapolados para a altura de 100 metros e então estas séries são transformadas em distribuições de frequências, contabilizadas para cada classe de velocidade (bins de 1 m/s de 1 a 20 m/s). Para a extrapolação dos dados de velocidade do vento da altura original do dado para a altura de 100 m, utilizou-se um método diferente para cada reanálise:

MERRA-2: Como esta série disponibiliza dados em 10 m e 50 m, optou-se por utilizar o método da Lei de Potência para a extrapolação das magnitudes das velocidades do vento. Esta lei é um modelo muito simples, porém útil do perfil vertical do vento e foi proposto primeiramente por Hellman (GUALTIERI e SAURO, 2012; HELLMAN, 1916). A equação é dada por:

$$v_2 = v_1 * \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^\alpha \text{ Equação 6}$$

Onde v_1 e v_2 são, simultaneamente, velocidades do vento em diferentes elevações h_1 e h_2 , respectivamente. O expoente α é o coeficiente de Helmann (ou de fricção) e depende da velocidade do vento, do coeficiente de rugosidade, da

estabilidade atmosférica e do intervalo de altura. Ele pode ser diretamente medido quando valores de v_1 e v_2 são disponibilizados:

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right)}{\ln\left(\frac{h_2}{h_1}\right)} \quad \text{Equação 7}$$

A partir das Equações 6 e 7 pode-se determinar a magnitude do vento a 100 metros para o MERRA-2.

CFSR: Esta série, diferentemente do MERRA-2, apenas disponibiliza dados de vento em 10 m. Para estes dados, optou-se por utilizar o método da Lei Logarítmica para determinar os valores de vento em 100 m. A Lei Logarítmica é outro modelo analítico tipicamente utilizado para calcular o perfil vertical do vento e é dada por:

$$v_2 = v_1 \ln\left(\frac{h_2}{z_0}\right) / \ln\left(\frac{h_1}{z_0}\right) \quad \text{Equação 8}$$

Onde z_0 é o comprimento de rugosidade, o qual foi fornecido por um mapa de rugosidade produzido por (LIMA, 2016). O mapa de rugosidade foi devidamente recortado e remapeado para a grade dos dados do CFSR, que é a grade padrão utilizada em todos os dados do produto. A Lei Logarítmica é derivada de um modelo físico mais geral baseado na teoria de similaridade de Monin-Obukhov, mas para o caso de estabilidade neutra. Ou seja, trata-se de uma simplificação e sua aplicação é válida para terrenos relativamente planos. Portanto, espera-se erros associados a regiões de topografia mais acentuada para os dados do CFSR.

Obs: adicionalmente, foram testados os métodos da Lei de Potência para os dados de CFSR, utilizando-se o a extraído dos dados do MERRA-2, bem como o método da Lei Logarítmica para o MERRA-2, utilizando o mapa de rugosidade. Por apresentarem resultados inferiores aos já citados métodos, estes foram descartados (resultados não incluídos).

ERAS: dados já disponibilizados na altura de 100 m, excluindo-se a necessidade de extrapolação vertical da velocidade do vento.

Agora com os dados padronizados a 100 metros, organizados em séries temporais e divididas em períodos mensais para cada um dos 42 pontos, finalmente os dados estão prontos para realizar a regressão. Decidiu-se dobrar o número de observações, utilizando-se os 42 pontos referente a 2016 e os mesmos 42 pontos, porém referentes a 2017, para obter uma regressão mais robusta. Calculou-se a regressão linear múltipla utilizando como variáveis preditoras (ou independentes) $x_{m,n}$ ($m=1:3$; $n=1:84$) as três reanálises e como variável resposta (ou dependente) y_n , os dados da base observacional EPE/METAR. Desta maneira, o modelo da regressão seria definido como:

$$MDL = b_1 + b_2 * x_1 + b_3 * x_2 + b_4 * x_3 \sim OBS \quad \text{Equação 9}$$

Onde MDL é o modelo definido pela regressão linear múltipla e b_j ($j=1, 2, 3, 4$) são os coeficientes de determinação do modelo. MDL pode ser definido como sendo igual ao valor de OBS quando incluído na equação o valor do erro da previsão do modelo. Na Figura 3 é apresentado para o mês de janeiro (2016 e 2017) o gráfico de dispersão de todas as 84 observações da base EPE/METAR (linha preta) versus os três conjuntos de reanálises (pontos vermelhos, verdes e azuis). Também é possível observar individualmente a reta que melhor representa cada conjunto de reanálise (linhas vermelha, verde e azul) e o valor do coeficiente de ajuste dessas retas (R^2) e o erro quadrático médio (RMSE). Por fim, é apresentado na figura os valores previstos MDL (pontos amarelos) determinados pelos coeficientes b_j da regressão e então aplicados aos dados das reanálises. A reta que melhor se ajusta aos dados de MDL é dada pela linha amarela e os valores de R^2 e RMSE da legenda são referentes ao modelo.

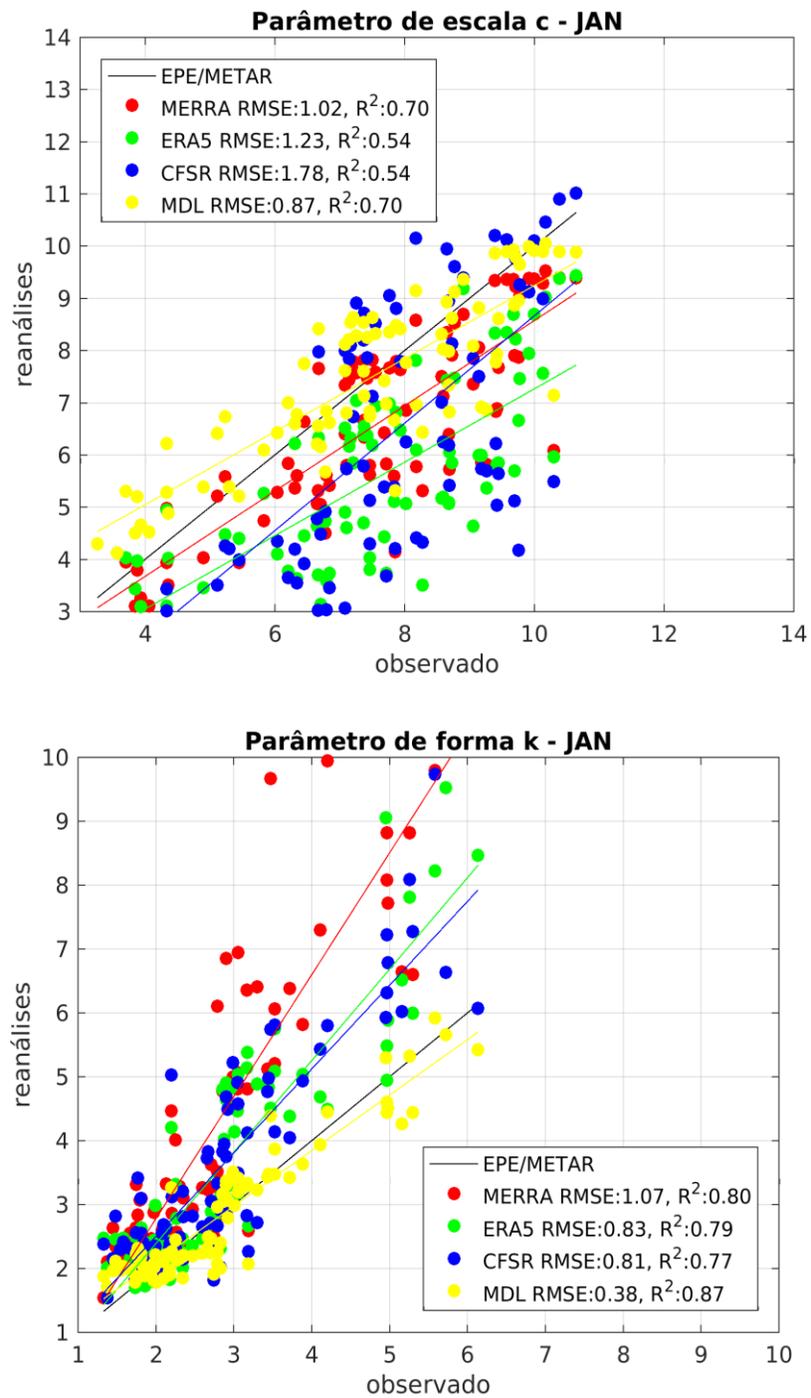


Figura 3: Dados observados versus reanálises e regressão linear para: a) fator de escala c; b) fator de forma k para o mês de janeiro. Demais figuras em Anexo.

Tabela 3: coeficientes de determinação extraídos da regressão linear e os coeficientes de ajuste R^2 parcial de cada reanálise extraídos das figuras a exemplo da Figura 3.

c, k	b1	b2	b3	b4	R ² MERRA	R ² ERA	R ² CFSR
JAN	1,718	0,934	0,037	-0,086	0,70	0,54	0,54
	0,664	0,177	0,173	0,216	0,80	0,79	0,77
FEV	2,417	0,827	-0,035	-0,028	0,61	0,47	0,46
	1,093	0,176	0,143	0,090	0,70	0,64	0,66
MAR	1,233	1,159	-0,186	-0,087	0,72	0,44	0,47
	0,990	0,078	0,199	0,161	0,55	0,71	0,65
ABR	1,746	1,140	-0,179	-0,149	0,61	0,37	0,35
	0,391	0,155	0,382	0,142	0,54	0,68	0,61
MAI	0,077	1,092	0,297	-0,302	0,74	0,62	0,56
	1,031	0,095	0,464	-0,075	0,53	0,72	0,52
JUN	0,938	0,772	0,355	-0,165	0,67	0,6	0,57
	0,601	0,087	0,552	-0,053	0,72	0,8	0,71
JUL	-0,385	0,928	0,471	-0,294	0,75	0,68	0,62
	0,404	0,276	0,383	-0,032	0,8	0,82	0,73
AGO	0,692	0,929	0,008	0,049	0,79	0,68	0,70
	0,911	0,008	0,245	0,253	0,76	0,82	0,81
SET	1,930	0,739	-0,033	0,157	0,81	0,73	0,75
	0,702	0,217	0,053	0,296	0,81	0,78	0,83
OUT	2,693	0,681	-0,187	0,266	0,76	0,64	0,72
	0,932	0,199	0,290	0,033	0,86	0,88	0,78
NOV	2,842	0,695	-0,248	0,314	0,78	0,67	0,75
	0,834	0,142	0,149	0,278	0,75	0,83	0,83
DEZ	3,004	0,666	-0,413	0,410	0,77	0,61	0,74
	0,822	0,125	0,309	0,098	0,84	0,88	0,8

A regressão foi realizada para todos os meses e os coeficientes de determinação foram, então, armazenados para serem aplicados à climatologia. Os valores obtidos podem ser conferidos na Tabela 3, onde lê-se os valores dos coeficientes a

serem aplicados ao parâmetro c (primeiros conjuntos de valores de cada linha) e ao parâmetro k (segundos conjuntos de valores) das climatologias mensais para a obtenção da reanálise combinada. Adicionalmente, aplicou-se pesos ao modelo ponderando pelo valor de R^2 informado nas três últimas colunas da Tabela 3. Os pesos foram aplicados considerando o seu valor relativo, de modo que $\text{peso}_1 + \text{peso}_2 + \text{peso}_3$ somassem 1. O objetivo é dar ainda maior peso aos dados considerados mais confiáveis. Por último, o modelo deveria seguir 3 critérios para que a nova base fosse fisicamente consistente. São eles:

- 1) Os coeficientes $b_2 + b_3 + b_4$ devem somar entre 0 e 1,2.;
- 2) Se b_1 for menor que 0, então $b_2 \cdot x_1 + b_3 \cdot x_2 + b_4 \cdot x_3$ deve ser maior do que b_1 ;
- 3) b_1 máximo igual a 3 para parâmetro c e igual 1 para k .

Estes critérios asseguram que a base de reanálises combinadas não apresente parâmetros com valores negativos ou muito superiores aos esperados.

3.4 Composição da base climatológica de reanálises

Para compor a base normal climatológica de dados de reanálises, foram selecionados os conjuntos de dados das bases MERRA-2, ERA5 e CFSR das últimas versões disponibilizadas por três diferentes grandes centros de pesquisa. Por normal climatológica, a Organização Meteorológica Mundial (do inglês, World Meteorological Organization - WMO) define como sendo uma média computada por um longo e uniforme período composto por, no mínimo, 30 anos consecutivos (WMO, 2017). O período histórico dos modelos climáticos, como definido no Plano de Trabalho desta consultoria (PRODUTO 1), compreende o período entre 1961 a 1990 para os modelos Eta/CPTEC e de 1979 a 2005 para o modelo HadRM3P. Aqui cabe uma adaptação para permitir uma padronização dos dados da base e simplificação do trabalho: os dados da base deverão compreender o maior período entre 1961 e 2005, o que resultou em um total de 26 anos de dados para o MERRA-2 e 27 anos para ERA5 e CFSR, em razão da própria disponibilidade dos dados. Citando novamente o manual técnico da WMO (WMO, 2017), onde é recomendado que para o cálculo de normais climatológicas estejam disponíveis

dados de ao menos 80% dos anos do período da normal, fica justificada a definição da base com 26-27 anos, que mais do que atende o recomendado para uma normal climatológica (24 anos). A seguir, maiores informações sobre os três conjuntos de reanálises:

3.4.1 MERRA-2

O MERRA (GELARO *et al.*, 2017), já na versão 2, disponibiliza dados a partir de 1980 até os dias atuais e é a última reanálise atmosférica do satélite da era moderna produzido pela NASA's Global Modeling and Assimilation Office (GMAO). A versão 2 veio para substituir a versão MERRA, que agora contém assimilação de dados de radiância hiperespectral e observações de microondas, além de conjunto de dados de GPS e rádio-ocultação. Foram também incluídos perfis de observação de ozônio. A resolução espacial, entretanto, se manteve mais ou menos a mesma (aproximadamente 50 km na direção latitudinal).

O MERRA-2 é produzido com o sistema de assimilação de dados GEOS. O componente chave deste sistema é o modelo atmosférico GEOS e o esquema de análises GSI. Maiores detalhes na documentação do MERRA-2 (GELARO *et al.*, 2017). Para adquirir estes dados, deve-se acessar a página online GES-DISC (<http://disc.gsfc.nasa.gov/datasets>).

Conforme mencionado, foram baixados dados do MERRA-2 para um total de 26 anos (de 1980 a 2005). Estes dados estão em resolução temporal horária e resolução espacial de 0,5° em latitude e 0,625° em longitude, totalizando 79 pontos em y e 64 pontos em x para o recorte selecionado. As variáveis escolhidas foram u10m, v10m, u50m e v50m. O total de arquivos baixados foi de 9.496 itens totalizando um volume bruto em disco de 13,3 GB.

3.4.2 ERA5

O ERA versão 5 é a mais recente versão de produtos de reanálises do ECMWF e está em processo de substituir o ERA-Interim (previsto de completar o processo de substituição até o final de 2019). O ERA5 cobre desde 1979 até 2 ou 3 meses antes

do período atual. Ele foi produzido utilizando o esquema de assimilação de dados 4D-Var no CY41R2 do modelo ECMWF Integrated Forecast System (IFS).

A resolução espacial do ERA5 é de 31 km ($\sim 0,28^\circ$) e os dados são disponibilizados em uma plataforma amigável na página do projeto Copernicus Climate Change Service Data Store – CDS (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/>). Entretanto, para poder fazer download de recortes geográficos e de longos conjuntos de dados, como foi o caso, é mais apropriado utilizar a ferramenta API (baixar via script em linguagem Python) que é disponibilizado também na página. Para o ERA5 foram solicitados dados do período compreendido entre 1979 e 2005 (27 anos), também em resolução temporal horária. A grade apresentava um total de 161 pontos em x e 157 pontos em y, e as variáveis selecionadas foram u100 e v100. O total de arquivos baixados foram 27, um para cada ano, totalizando um volume bruto de 23,9 GB.

3.4.3 CFSR

O terceiro dado a compor a base é proveniente do NCEP. O Climate Forecast System Reanalysis (SAHA *et al.*, 2006), tem duas versões: a primeira CFSR cobre o período de 1979 até março de 2011 e a versão CFSRv2 cobre de 2011 até o período presente. Todas as observações convencionais e de satélites foram incluídas no CFSR. Em relação às reanálises anteriores, o CFSR apresentou algumas vantagens no momento em que foi publicado, como acoplamento oceano-atmosfera na geração do campo da análise, implementação de um modelo interativo gelo-oceano e assimilação de radiâncias de satélite por esquema de interpolação estatística. A resolução espacial é de aproximadamente 38 km. Para obter estes dados do CFSR, é preciso solicitar, porém com login e senha, na página da NCAR Research Data Archive (<https://rda.ucar.edu/datasets/ds093.1/>)

Para o CFSR foram baixados dados também do período de 1979 a 2005 e em resolução temporal horária. As variáveis solicitadas foram eastward_wind e northward_wind, ambas a 10m. A grade total apresentou um total de 195 pontos em x e 190 pontos em y, com volume total de dados de 18 GB.

3.4.4 Preparação dos dados climatológicos para aplicar o modelo da regressão linear

Nesta etapa se faz necessária a aplicação de uma sistemática ainda mais cuidadosa no trabalho. Por se tratarem de dados muito volumosos, erros em etapas parciais do trabalho podem se tornar muito difíceis de se perceber até que se chegue ao final, implicando em muito mais tempo de processamento dos dados. Para um criterioso andamento desta etapa, alguns cuidados foram tomados e uma sequência muito bem definida foi adotada.

Após o download dos dados climatológicos, que estão em resolução temporal horária, ou seja, possuem muitos passos de tempo (da ordem de 236 mil), torna-se inviável abrir o arquivo para checar a integridade do arquivo por completo. Uma primeira verificação é feita pelo tamanho do arquivo recém baixado: arquivos que possuem a mesma grade e o mesmo número de passos de tempo (mesma quantidade de meses ou dias, vezes 24 horas, por exemplo), devem possuir o mesmo tamanho em kB. Uma segunda verificação é feita abrindo-se o arquivo e plotando uma variável para tempos aleatórios. Essa verificação é especialmente importante quando realizado algum tipo de processamento no dado no qual se espera ou não mudança nos campos da variável, como por exemplo, remapeamento ou recorte da grade. Para garantir que tudo está em ordem com o dado, confere-se campos de datas aleatórias supostamente do início, do meio e do final do arquivo comparando com o dado do passo anterior, diminuindo a chance de deixar passar algum problema despercebido para as próximas etapas. Essas verificações, por mais exaustivas e demoradas, evitam que se perca muito mais tempo procurando por um erro ou que se tenha que reprocessar os dados de volumes colossais desde o início, implicando em tempo muito maior de trabalho. O esquema da Figura 4 resume o processo passo a passo pelo qual foram submetidos os dados até estarem prontos para a aplicação do modelo de regressão linear.



Figura 4: representação esquemática do processamento das reanálises anterior a aplicação do modelo de regressão linear.

A partir dos dados brutos que, dependendo do conjunto de reanálise, pode vir dividido em diversos arquivos diários ou anuais, inicialmente realiza-se um agrupamento utilizando-se algum software de manipulação de dados ambientais, como o CDO. Estes dados foram baixados em recortes o mais próximo da grade padrão, mas na resolução oferecida pelos centros, sendo que o próximo passo é remapear os dados, ou seja, fazer uma transformação nas grades, utilizando alguma ferramenta, como por exemplo a função "remapbil", do CDO, para interpolar a grade original dos dados na grade padrão do produto. Para representar a grade modelo na ferramenta de remapeamento foi utilizado um recorte do modelo Eta/CPTEC que será utilizado nas projeções climáticas dos produtos 5 e 6 da consultoria. As reanálises disponibilizam as variáveis vento em diferentes alturas, por isto, é necessário uma extrapolação vertical do vento para 100 metros, utilizando diferentes métodos conforme comentado na subseção 3.3. E por fim, quando os arquivos unitários das reanálises estão padronizados, procede-se com os recortes mensais para poder passar à próxima etapa. Todas as etapas seguiram um *check list* de verificações, que incluem a utilização de programas de

visualização de dados ambientais, como GrADS, e ferramentas de verificação de metadados de arquivos em formato netcdf, entre outras.

O último passo de processamento das reanálises envolveu a determinação dos fatores de forma e escala de Weibull mensais climatológicos, para cada uma das reanálises. O método de determinação dos parâmetros mensais para cada um dos 26 ou 27 anos (dependendo do conjunto de reanálise) foi o método gráfico, o mesmo mencionado na subseção 3.2.

Para o cálculo do fator de escala c climatológico mensal, foi determinado que a melhor maneira de calcular seria determinando-se a mediana dos fatores de escala c ao longo dos 26/27 anos. Para o cálculo do fator de forma k , no entanto, determinou-se que este seria o valor de k associado ao fator de escala c climatológico, para evitar criar uma condição irreal, com um k inexistente.

O cálculo dos parâmetros de Weibull, que envolveu um alto custo computacional, foi aplicado a cada ponto de grade de cada um dos 12 arquivos mensais das 3 reanálises. Lembrando que cada grade, que compreende todo o território brasileiro, possui 201 pontos em latitude por 196 pontos em longitude, e que cada ponto de cada arquivo mensal com resolução horária (da ordem de 20 mil tempos) deve ser lido integralmente para a contabilização das frequências das velocidades do vento. Ao final deste procedimento, uma grade com 39.396 pontos, gravadas para os parâmetros c e k mensais climatológicos de cada uma das três reanálises foi armazenada.

3.5 Aplicação do modelo de RLM para construção da Reanálise Combinada

Esta foi a última etapa do trabalho, e consistiu em aplicar o modelo de regressão linear determinado na subseção 3.3 às reanálises. Utilizando-se a Equação 9, onde b_j são substituídos e ponderados pelos valores mensais da Tabela 3 e x_m são substituídos pelos valores mensais de c e k armazenados no último passo do processamento das reanálises, obteve-se os valores para todos os pontos de grade dos parâmetros c e k mensais climatológicos para a base de dados final, chamada de Reanálise Combinada.

4. Resultados

O primeiro aspecto verificado foi a capacidade do modelo obtido pela regressão linear da subseção 3.3 em prever os valores dos parâmetros c e k para o mesmo período do treino da regressão (2016 e 2017). As Figuras 5 e 6 apresentam a comparação “Previsto x Observado”, onde “Previsto” são os valores determinados pelo modelo de regressão linear múltipla quando aplicado às reanálises para cada uma das 84 estações (42 referentes a 2016 e 42 referentes a 2017), e “Observado” refere-se aos dados medidos pela base EPE/METAR.

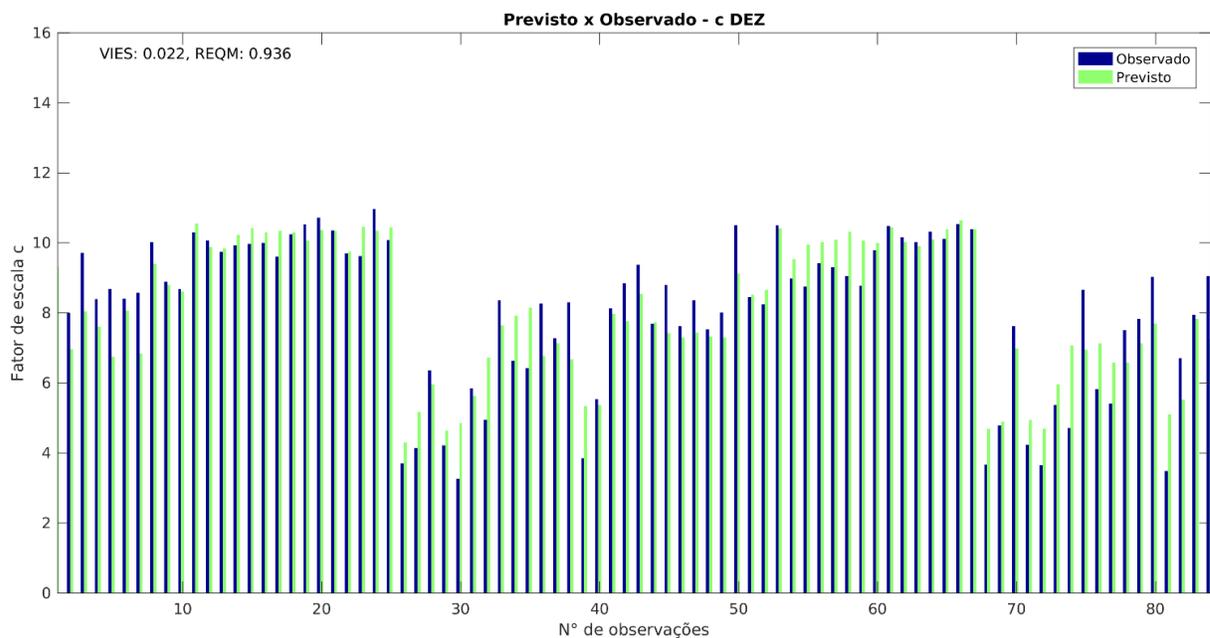


Figura 5: Valores observados (barras azuis) e previstos (barras verdes) do fator de escala c utilizando-se o modelo de regressão linear referente ao mês de dezembro.

O viés e a raiz do erro quadrático médio (REQM) são dados pelas Equações 10 e 11 a seguir:

$$viés = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i) \quad \text{Equação 10}$$

$$REQM = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2} \quad \text{Equação 11}$$

Onde x é a grandeza (c ou k) estimada pelo modelo de regressão linear e y a grandeza observada em cada uma das N medidas i .

Levando-se em conta a raiz do erro quadrático médio, o melhor resultado encontrado para o fator de escala c foi para o mês de dezembro ($REQM=0,936$, $viés=0,022$) e o pior para o mês de junho ($REQM=1,557$, $viés=-0,010$). Para o fator de forma k , o melhor resultado foi para o mês de dezembro ($REQM=0,450$, $viés=0,002$) e o pior para o mês de setembro ($REQM=0,778$, $viés=-0,002$). As figuras referentes a todos os meses encontram-se na seção de Anexos deste relatório.

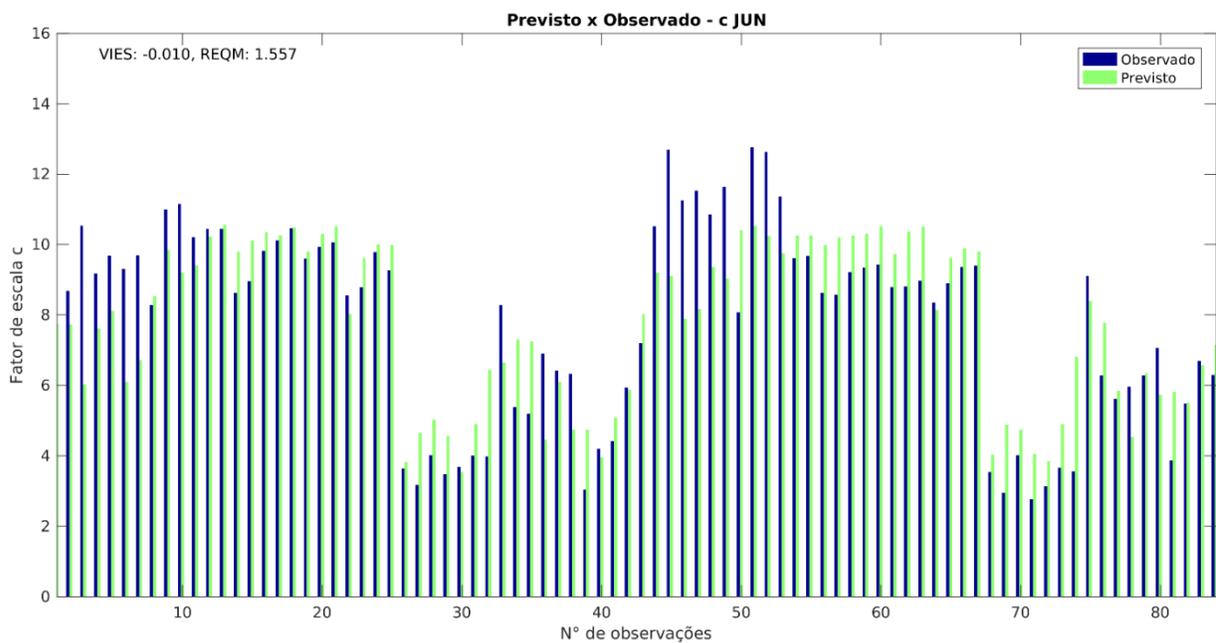


Figura 6: Valores observados (barras azuis) e previstos (barras verdes) do fator de escala c utilizando-se o modelo de regressão linear referente ao mês de junho.

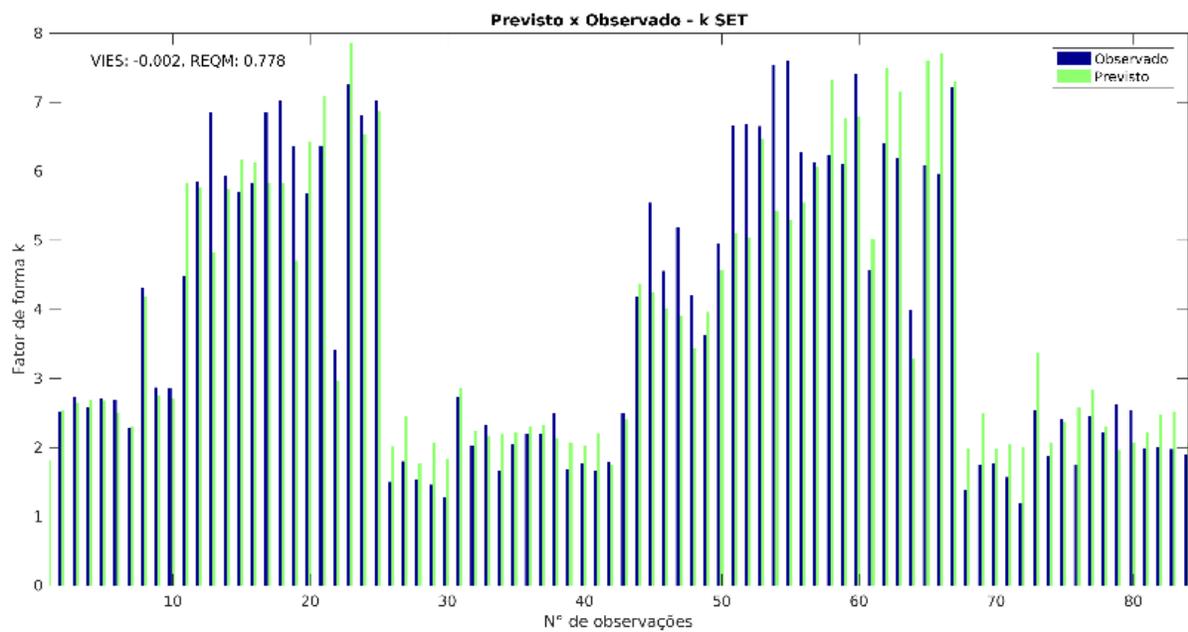
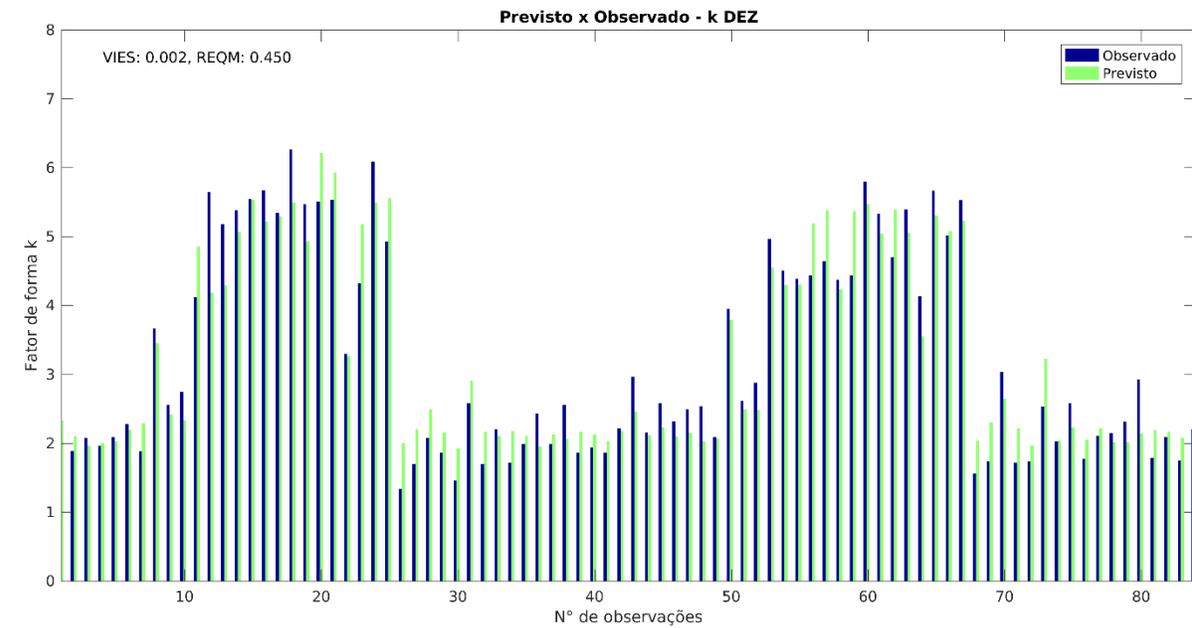


Figura 7: Equivalente a figura 5 e 6, porém para fator de forma k , e referente aos meses de dezembro e setembro.

O próximo passo seria checar se a Reanálise Combinada, ou seja, o produto final do modelo quando aplicado às climatologias das reanálises, estaria de acordo com a base observada. Lembrando que a ideia da base consolidada não é reproduzir perfeitamente o dado observado, mas que ela seja fisicamente consistente e que, dessa maneira, permita avaliar as incertezas dos modelos climáticos.

As Figuras 8 e 9 apresentam os gráficos de dispersão “Observado” versus “Reanálise Combinada” dos parâmetros c e k para os 12 meses. Os pontos vermelhos representam a Reanálise Combinada quando comparada às observações de 2016, ou seja, as primeiras 42 observações. Os pontos de cor azul representam o período de 2017 (últimas 42 observações). O coeficiente de correlação de Pearson (R) foi calculado para toda a distribuição de pontos (2016 e 2017) e conforme descrito a seguir:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad \text{Equação 12}$$

Onde \bar{x} e \bar{y} indicam as médias das grandezas x e y (estimada e observada).

Os gráficos das Figuras 8 e 9 demonstram que a base consolidada apresenta boa concordância com os dados observados da base EPE/METAR. Tanto para o fator de escala quanto para o fator de forma, as figuras mostram valores de correlação acima de 0,72 entre os dados. Entretanto, alguns meses apresentaram melhores resultados em relação aos outros. Para o fator de escala c , o mês de agosto foi o que apresentou ligeiramente a melhor correlação, $R=0,919$, e vies entre -0,13 e -0,24 e REQM entre 1,13 e 1,14, enquanto o mês de janeiro apresentou a pior correlação, $R=0,727$ e vies entre 0,32 e -0,41 e REQM entre 1,33 e 1,34. Para o fator de forma k , o mês de novembro foi o que apresentou melhor resultado ($R=0,969$; vies=-0,29 e REQM entre 0,69 e 0,79), enquanto abril apresentou o pior ($R=0,778$; vies entre -0,14 e -0,17 e REQM entre 0,50 e 0,54).

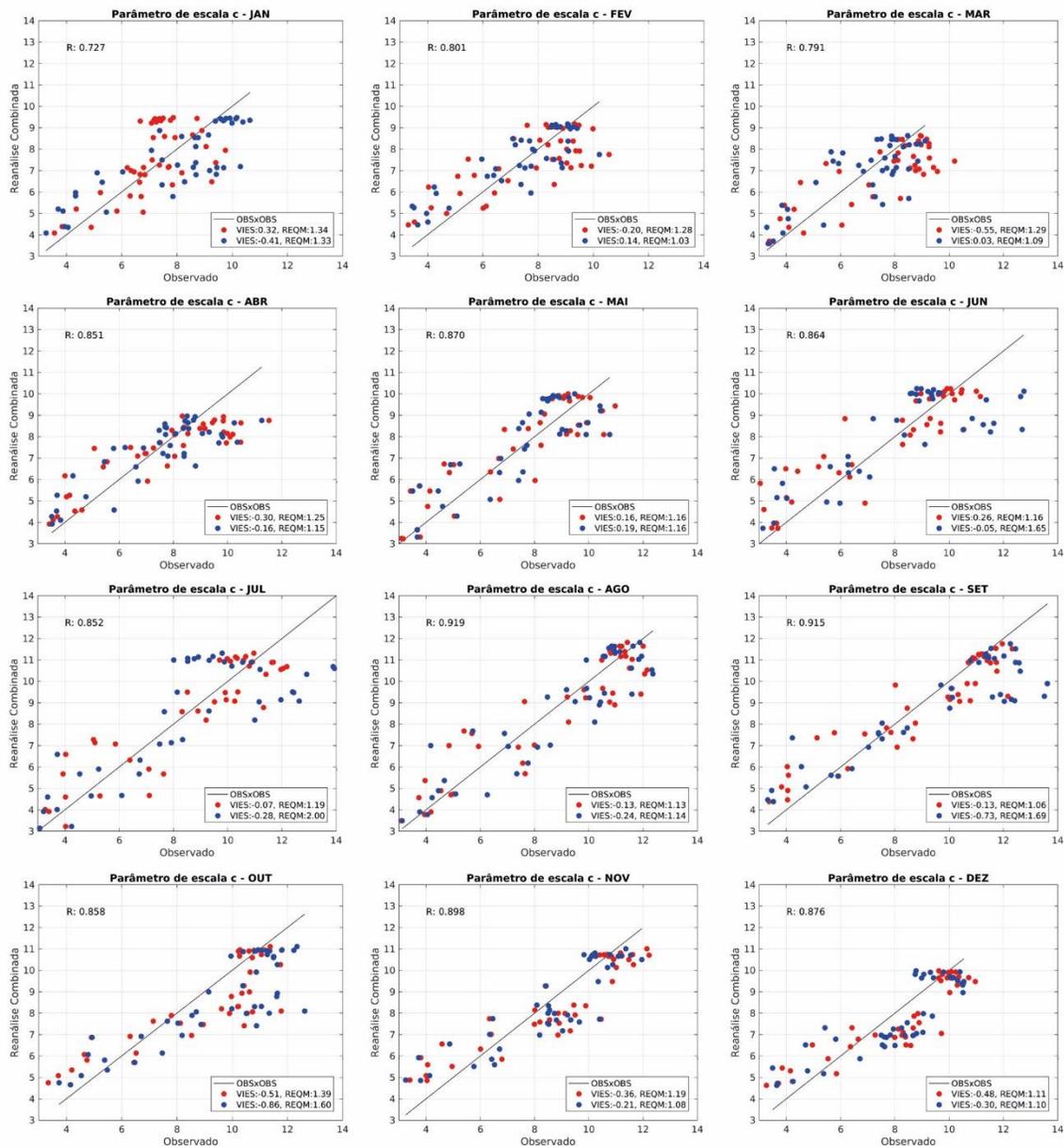


Figura 8: Gráfico de dispersão Observação versus Reanálise Combinada em relação a 2016 (vermelho) e 2017 (azul) para o fator de escala.

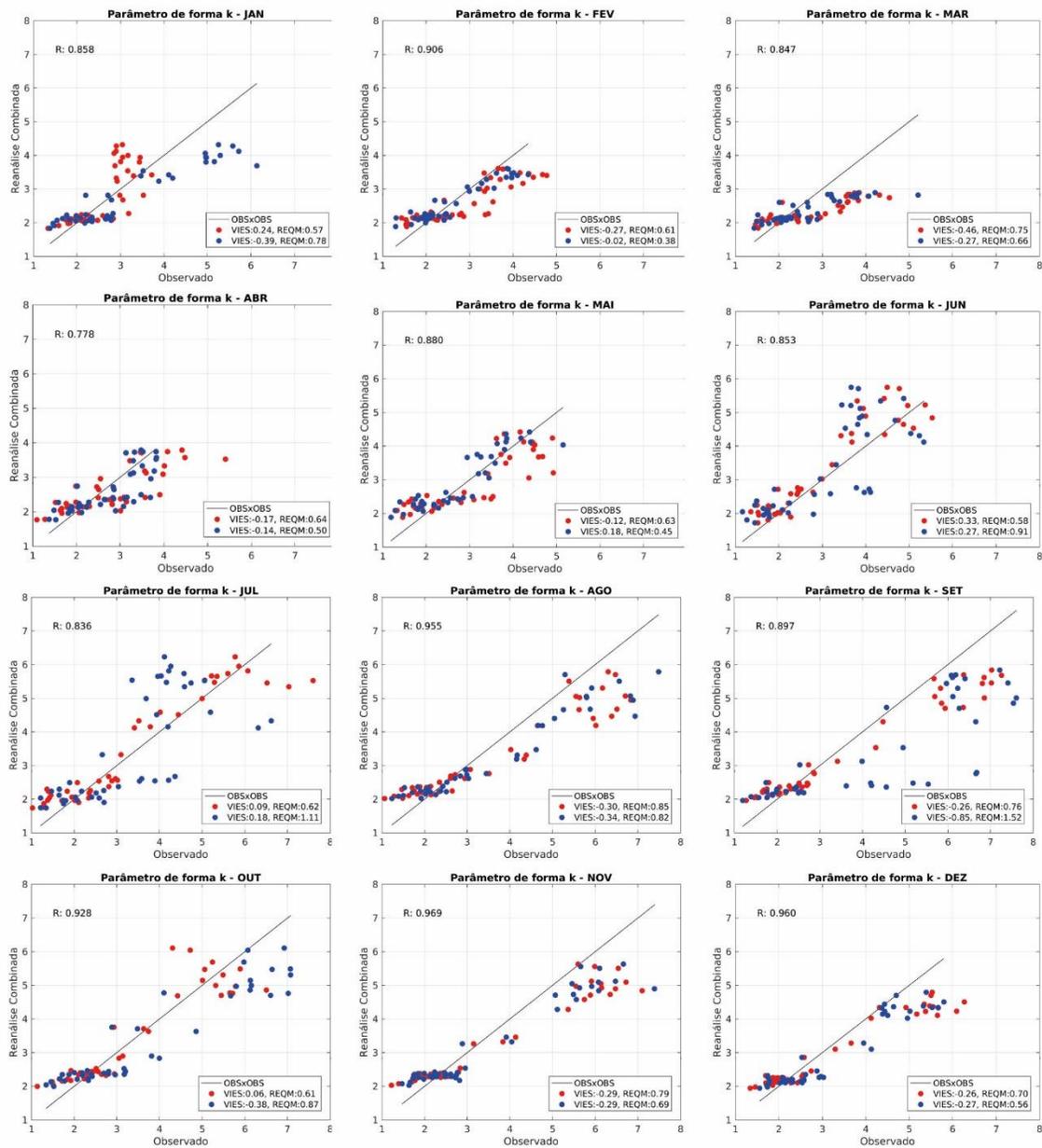


Figura 9: Gráfico de dispersão Observação versus Reanálise Combinada em relação a 2016 (vermelho) e 2017 (azul) para o fator de forma.

Por fim, para verificação da distribuição espacial do produto 3, foram utilizados para comparação dados provenientes do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro produzido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) em 2001 (http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf). Estes dados foram produzidos dentro do sistema MesoMap, que é constituído por um modelo de mesoescala chamado Mesoscale Atmospheric Simulation System (MASS) em conjunto com um modelo de microescala de camada limite atmosférica chamado WindMap (maiores detalhes no Atlas).

Aqui cabe chamar a atenção para o fato de que a comparação entre estes dois dados serve apenas para determinar se a Reanálise Combinada apresenta uma distribuição espacial coerente e compatível com o dado disponível até o momento. Uma comparação em um alto nível de detalhamento pode ser injusta, uma vez que os dados do Atlas foram produzidos por um modelo de mesoescala que simula fenômenos de escalas mais reduzidas, como ondas orográficas, ventos convectivos e brisas, e são entregues pelo modelo em uma resolução de até 1 km. Por outro lado, a Reanálise Combinada, com 20 km de resolução, não se propõe a descrever a distribuição espacial com este nível de detalhamento. Sua função é possibilitar um ajuste para os dados dos modelos climáticos de modo que o tempo presente represente o mais próximo possível do observado, e dessa maneira se possa quantificar, com a remoção de vieses, o impacto das mudanças climáticas no recurso eólico.

Uma vantagem da Reanálise Combinada, no entanto, é que os dados disponibilizados pelo CEPEL para os parâmetros de forma e escala são anuais (ainda que o Atlas apresente cartas sazonais para os parâmetros e outras grandezas), enquanto a Reanálise Combinada foi produzida em escala mensal. Outro avanço permitido pelo produto é o caráter climatológico dos dados. A Reanálise Combinada é representativa de uma série de 30 anos e esse período coincide com o período histórico dos modelos climáticos que serão utilizados nos próximos produtos, enquanto o Atlas do CEPEL é representativo de uma série de 15 anos e não fica muito claro qual o período utilizado nas simulações. Aqui o Atlas foi

utilizado meramente como uma referência para comparação da distribuição espacial dos parâmetros de forma e escala.

A Figura 10 apresenta a distribuição espacial do fator de escala climatológico para o Atlas (figura superior) e para a Reanálise Combinada (figura inferior). A Figura 11 apresenta a diferença percentual ($[(Rcomb - Atlas)/Atlas]$) para todo o território brasileiro. O resultado demonstra que, para a maior parte do território, a diferença percentual entre os produtos fica confinada entre mais ou menos 10%, com exceção do sul do Brasil, do norte do Pará e dos estados de Roraima, Rondônia e Acre, em que as subestimativas são superiores a 20%, superando os 30% apenas em locais muito pontuais, como no estado no Paraná. E de algumas regiões localizadas sobre o Nordeste, onde a Reanálise Combinada apresentou valores com diferença maiores do que 20% acima do Atlas e, mais localmente, até 30% maiores que o Atlas.

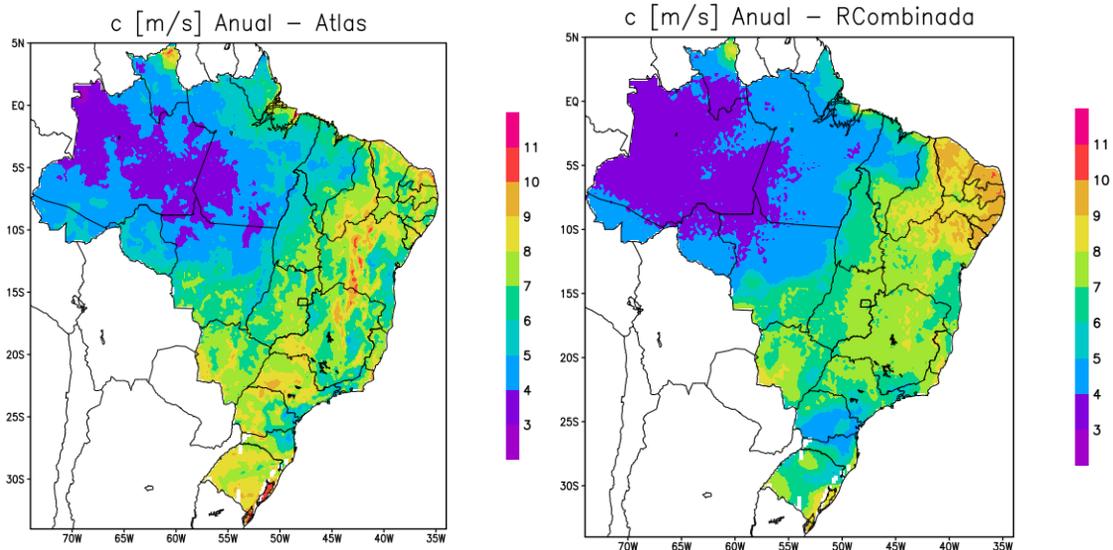


Figura 10: Comparação entre a distribuição espacial do fator de escala climatológico produzido com a) dados do Atlas CEPEL/2001 e b) Reanálise Combinada.

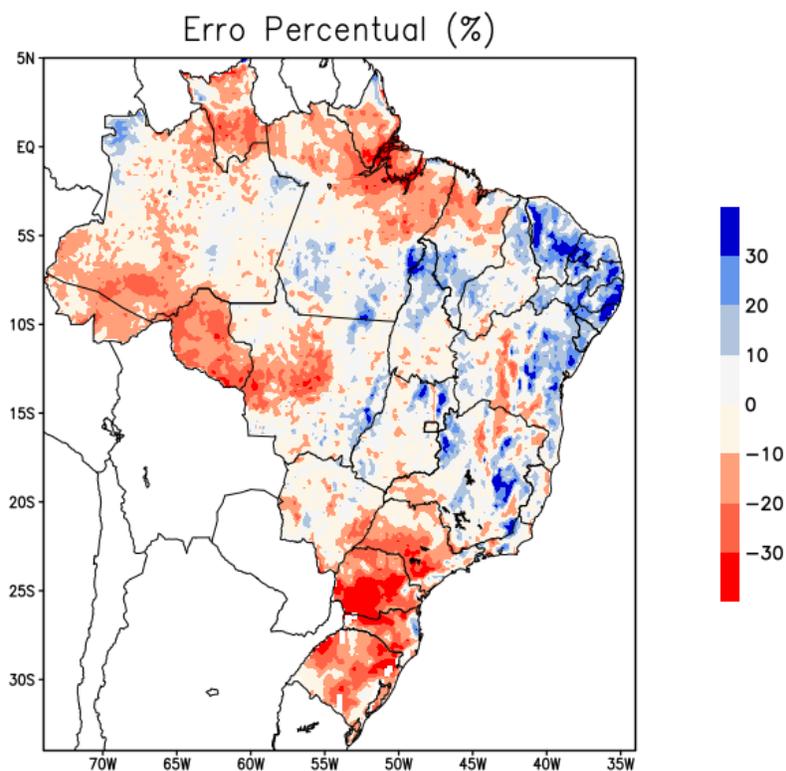


Figura 11: Diferença percentual entre Reanálise Combinada e Atlas CEPEL/2001 para fator de escala climatológico.

A Figura 12 mostra a distribuição espacial do fator de forma para o Atlas e a Reanálise Combinada. A diferença percentual é apresentada na Figura 13, onde se pode ver que, para a grande maior parte do território, a diferença entre os produtos comparados ficou entre mais ou menos 10%, com exceção de setores do Sul, Sudeste e Centro-Oeste, que apresentam diferenças negativas entre 10 e 20% e estados do norte do país, com diferenças positivas entre 10 e 20%, com destaque para o norte do Pará, que apresentou os maiores valores de diferença percentual (maiores do que 30% superiores ao Atlas).

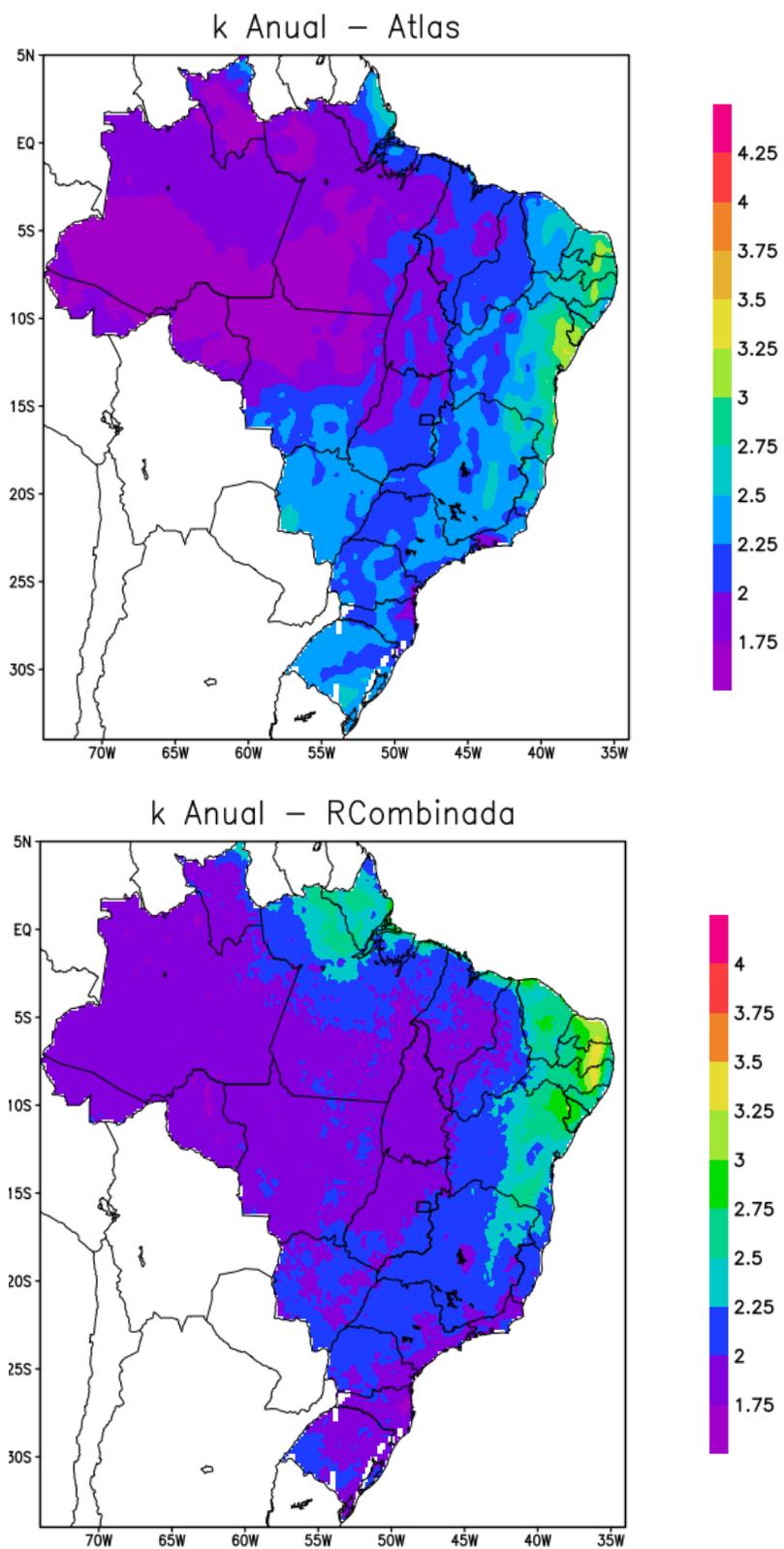


Figura 12: Comparação entre a distribuição espacial do fator de forma climatológico produzido com a) dados do Atlas CEPEL/2001 e b) Reanálise Combinada.

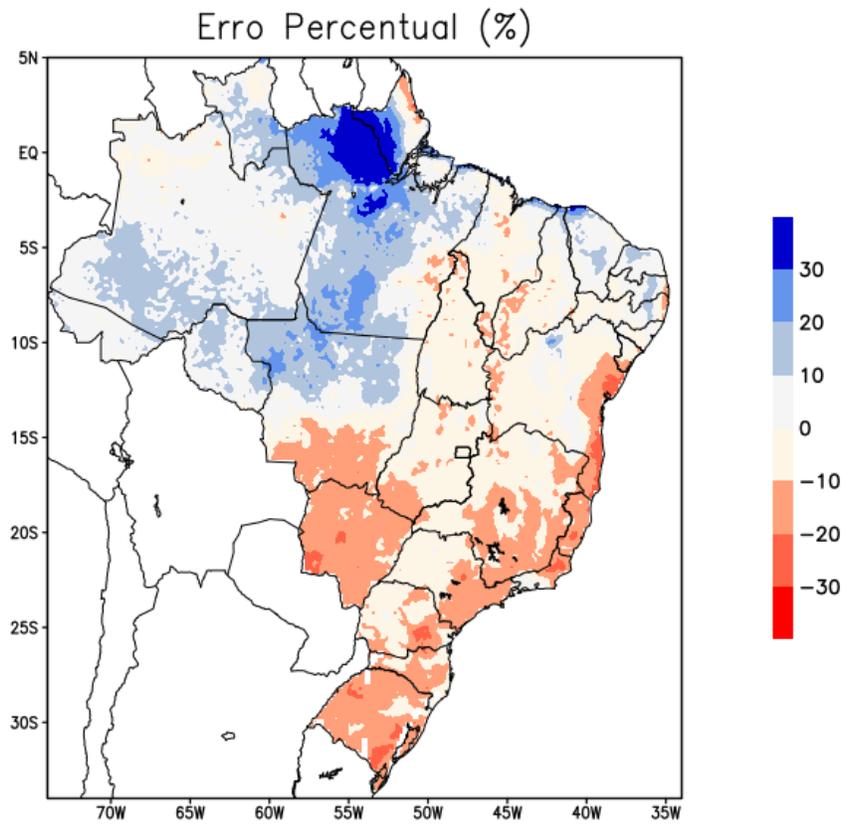


Figura 13: Diferença percentual entre Reanálise Combinada e Atlas CEPEL/2001 para fator de forma climatológico.

As Figuras 14 e 15 apresentam os resultados finais do produto 3, ou seja, a climatologia mensal dos fatores de escala e de forma para o território brasileiro.

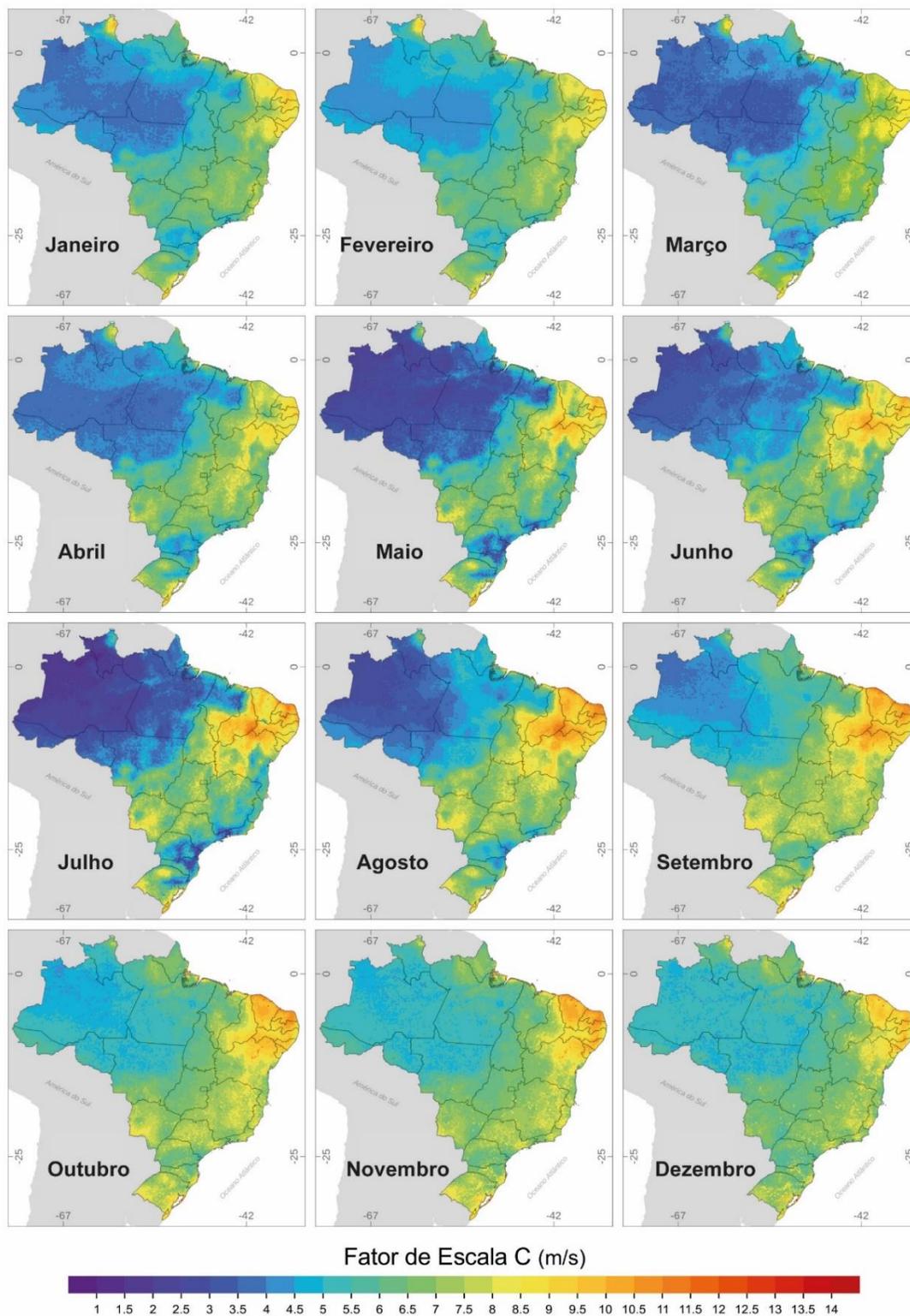


Figura 14: Fator de escala climatológico produzido com dados da Reanálise Combinada

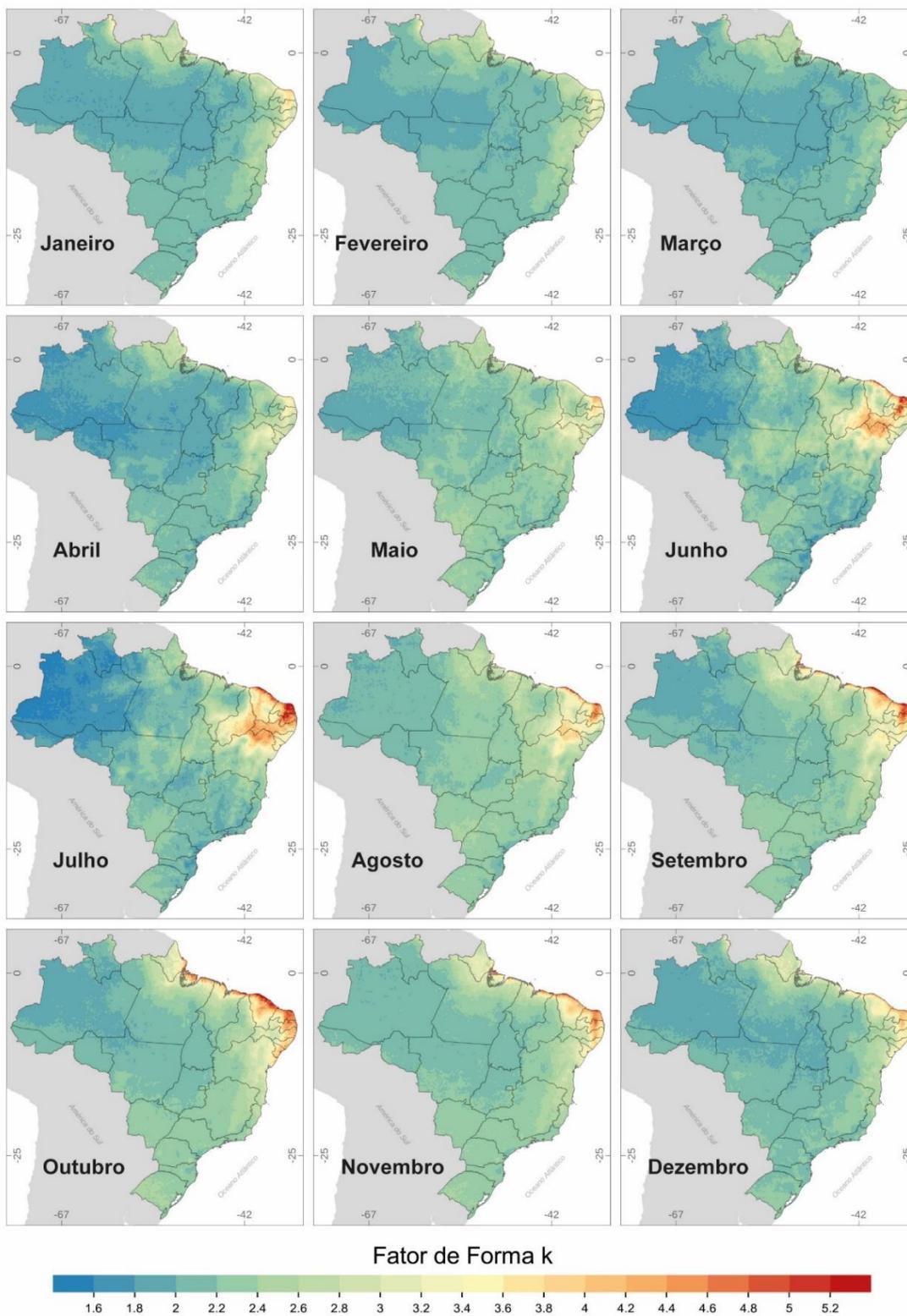


Figura 15: Fator de forma climatológico produzido com dados da Reanálise Combinada

5. Considerações Finais

O produto 3 foi desenvolvido com o objetivo de possibilitar a quantificação da disponibilidade futura do recurso eólico no Brasil. Para que isto seja possível, uma base consolidada e em resolução temporal e espacial compatíveis com os modelos climáticos que irão gerar os dados dos próximos produtos se faz necessária. A base de dados desenvolvida neste produto, que se chama Reanálise Combinada, utilizou-se de inferência estatística, da qual uma amostra (pontos medidos) com dados observados qualificados possibilitou inferir sobre os resultados da população (território brasileiro) a partir de um modelo de regressão linear e da combinação de diferentes conjuntos de reanálises.

Os resultados mostraram que a Reanálise Combinada reproduz razoavelmente bem 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. Na comparação com outro produto (Atlas CEPEL/2001), embora os produtos sejam de naturezas distintas, produzidos com diferentes metodologias e destinados a aplicações também diferentes, os resultados mostraram que a Reanálise Combinada foi capaz de reproduzir os aspectos principais da distribuição espacial dos parâmetros de forma e escala na climatologia anual para o território brasileiro, com diferenças entre mais ou menos 10% para a maior parte do território, com diferenças maiores que 20% e 30% apenas em regiões bastante localizadas.

A Reanálise Combinada constitui-se, assim, em um instrumento fundamental para que se possa avaliar os recursos eólicos futuros para a geração de energia elétrica, podendo também ter outras aplicações que utilizem dados mensais de distribuição de frequências da velocidade do vento na resolução espacial de 20 km.

6. Referências Bibliográficas

AKDAG, S. A.; DINLER, A. A new method to estimate Weibull parameters for wind energy applications. **Energy Conversion and Management**, v. 50, p. 1761-1766, 2009.

EHRET, U. et al. Should we apply bias correction to global and regional climate model data? **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v. 16, n. 9, p. 3391-3404, 2012.

GELARO, R. et al. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2). **Journal of Climate**, v. 30, n. Special Collection, p. 5419-5454, 2017.

GUALTIERI, G.; SAURO, S. Methods to extrapolate wind resource to the turbine hub height based on power law: A 1-h wind speed vs. Weibull distribution extrapolation comparison. **Renewable Energy**, v. 43, p. 183-200, 2012.

HELLMAN, G. Über die Bewegung der Luft in den untersten Schichten der Atmosphäre. **Meteorol Z**, v. 34, p. 273-285, 1916.

LIMA, F. J. L. **Relatório de Atividades - Subrede Energias Renováveis**. Rede Brasileira de Pesquisas em Mudanças Climáticas. [S.l.]. 2016.

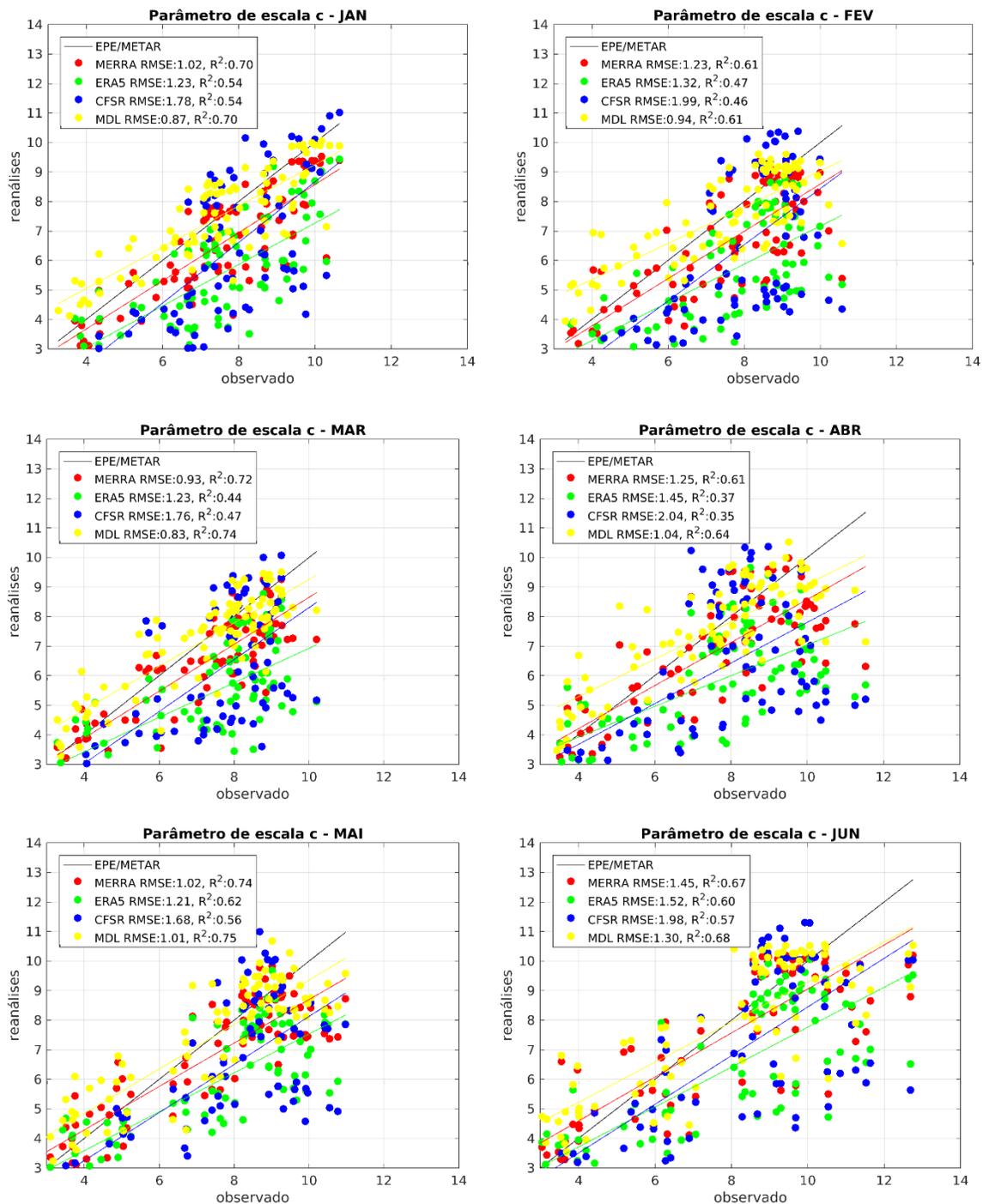
SAHA, S. et al. The NCEP Climate Forecast System. **Journal of Climate**, v. 19, p. 3483-3517, 2006.

SEGURO, J. V.; LAMBERT, T. W. Modern Estimation of the Parameters of the Weibull Wind Speed Distribution for Wind Energy Analysis. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 85, n. 1, p. 75-84, 2000.

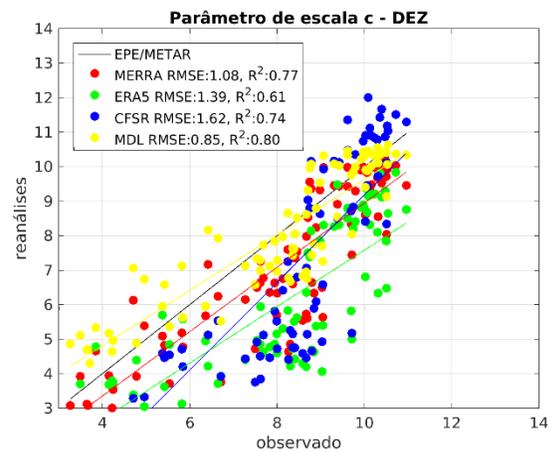
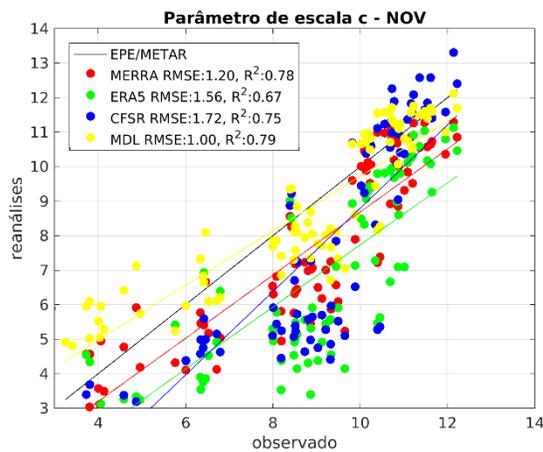
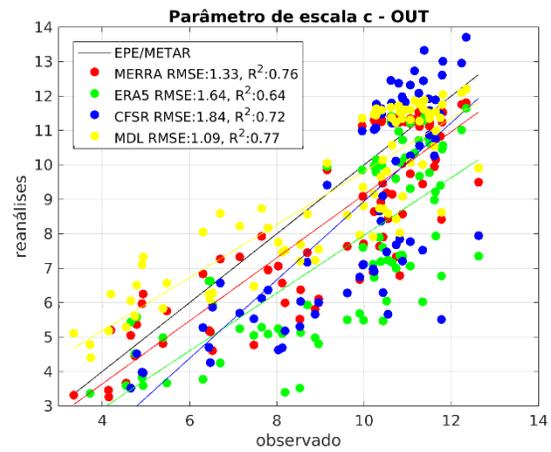
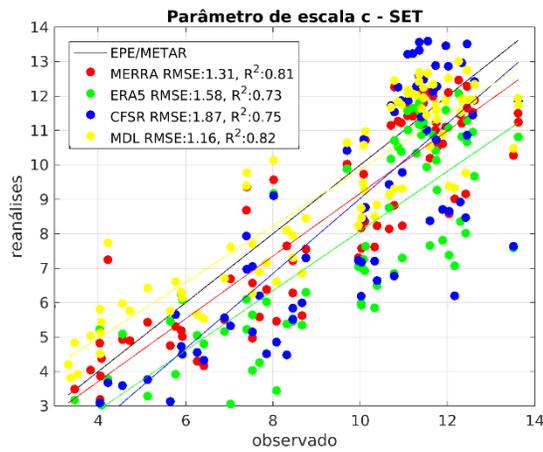
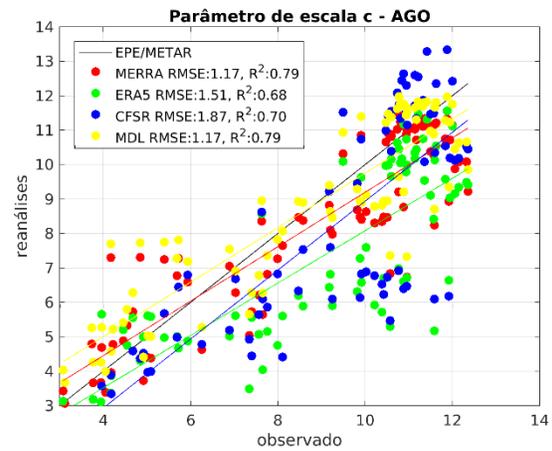
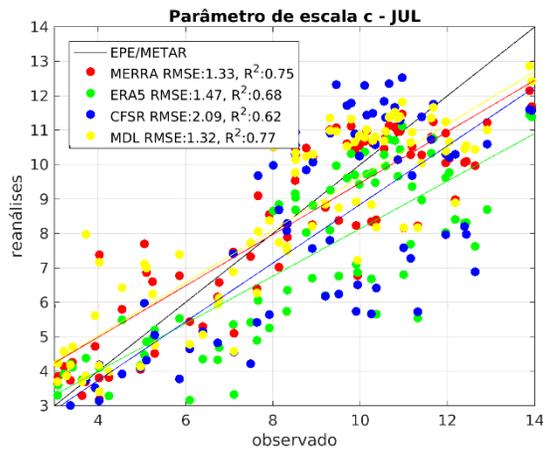
STAFFELL, I.; PFENNINGER, S. Using bias-corrected reanalysis to simulate current and future wind power output. **Energy**, v. 114, p. 1224-1239, 2016.

WMO. **WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals**. World Meteorological Organization. Geneva 2. 2017. (2017 edition).

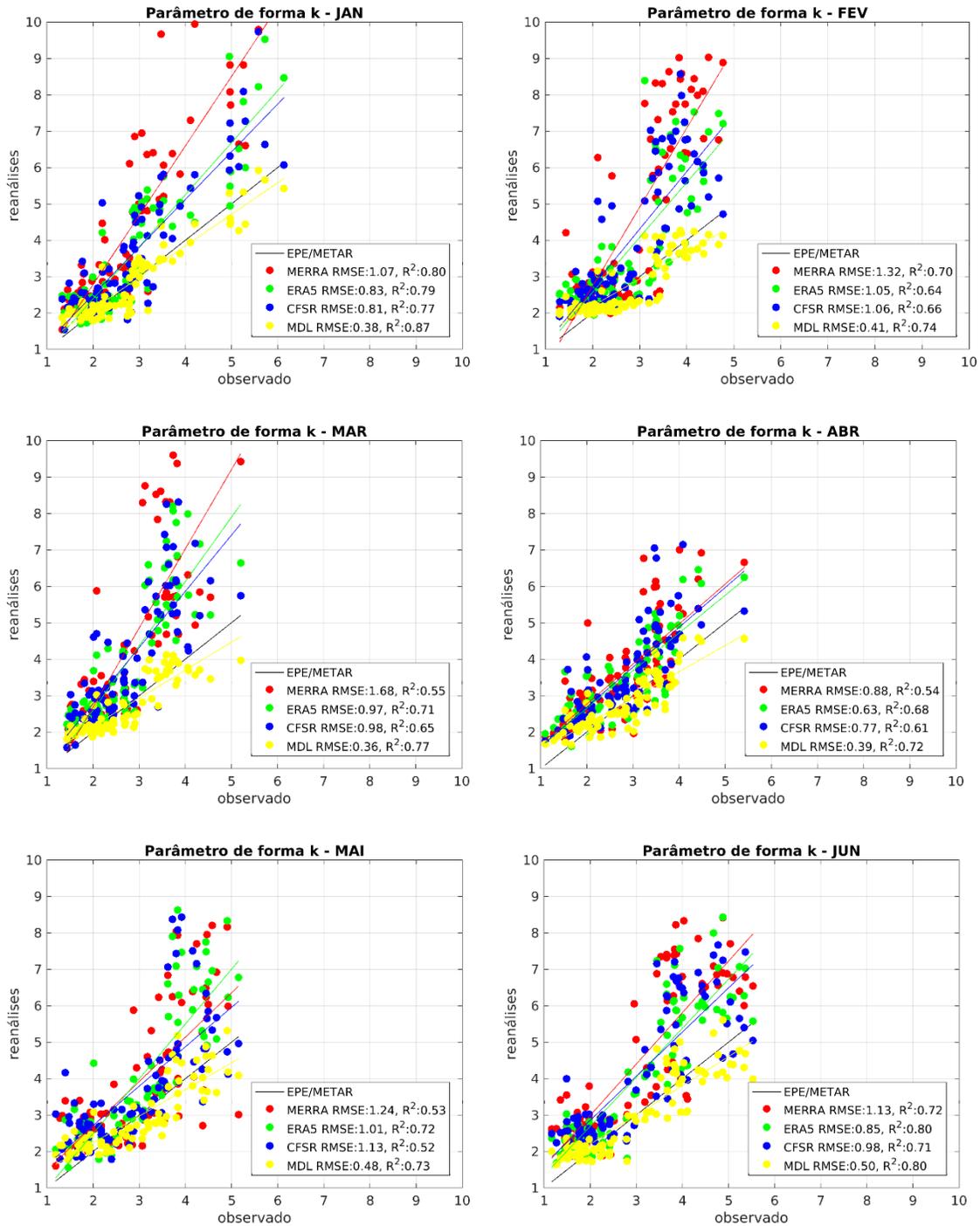
ANEXO 1: Fator de escala. OBS x Reanálises e modelo de regressão linear



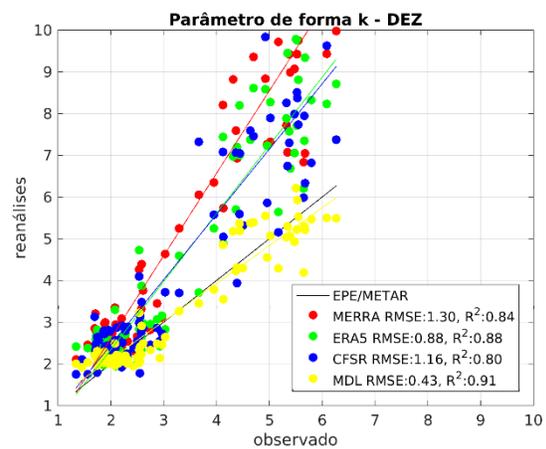
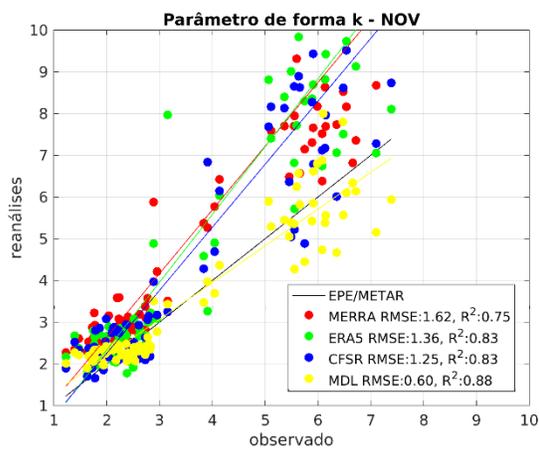
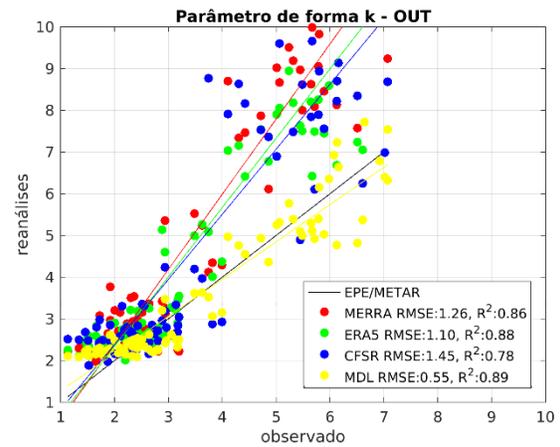
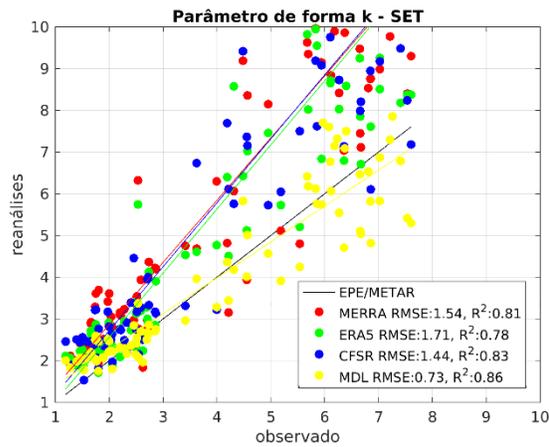
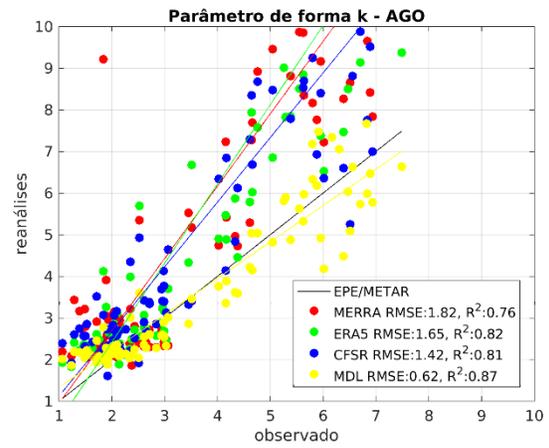
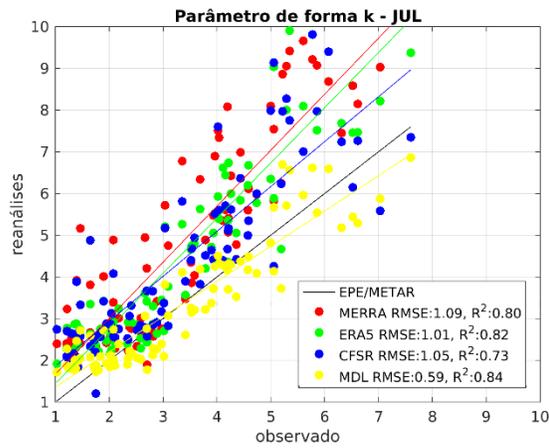
Continuação:



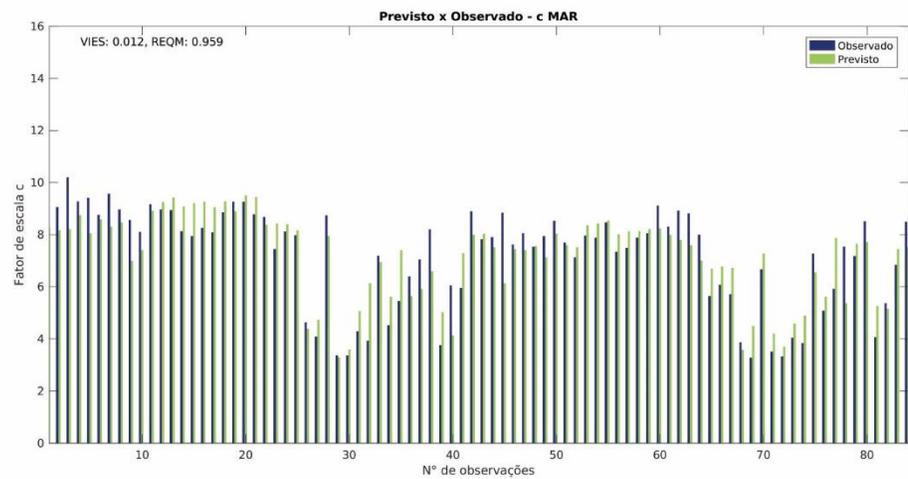
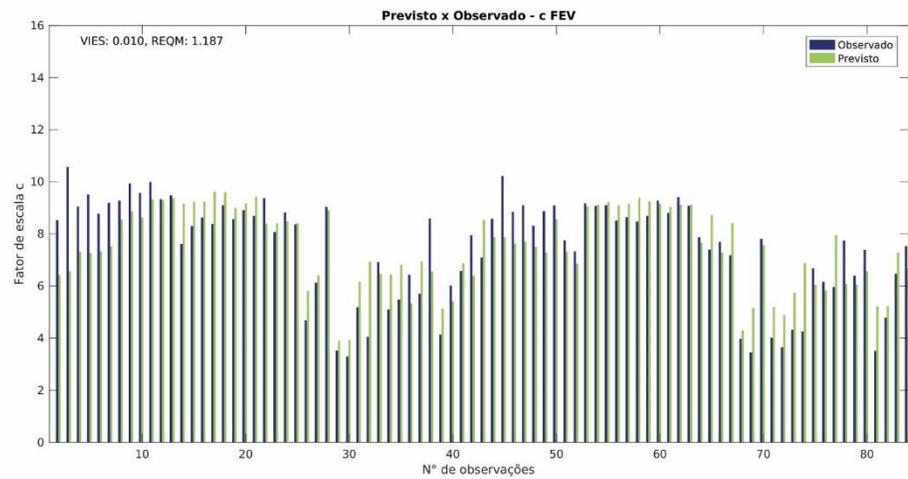
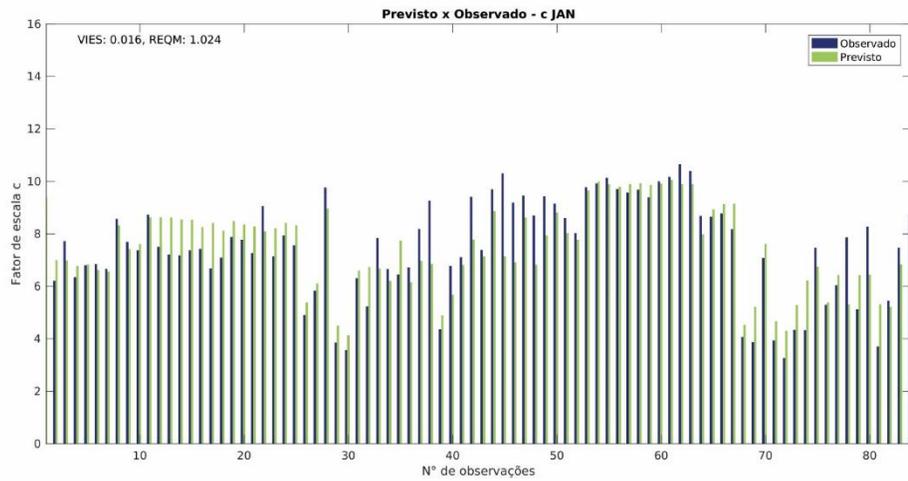
ANEXO 2: Fator de forma. OBS x Reanálises e modelo de regressão linear



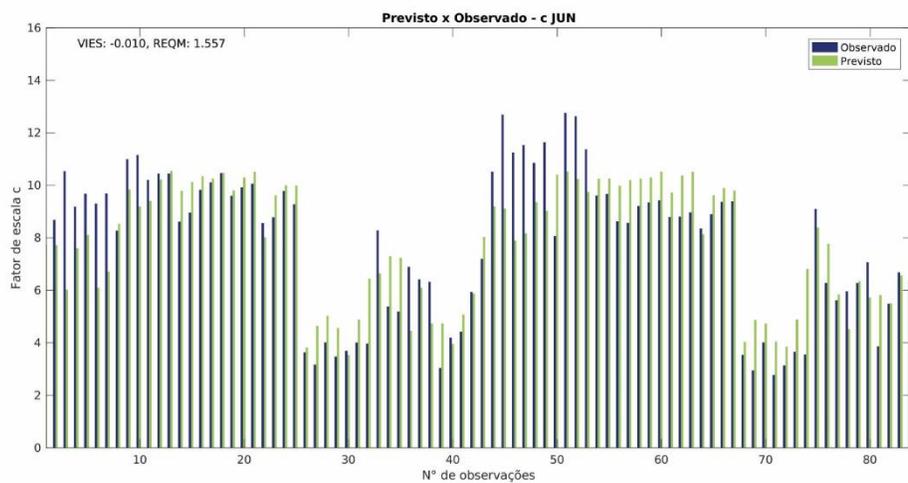
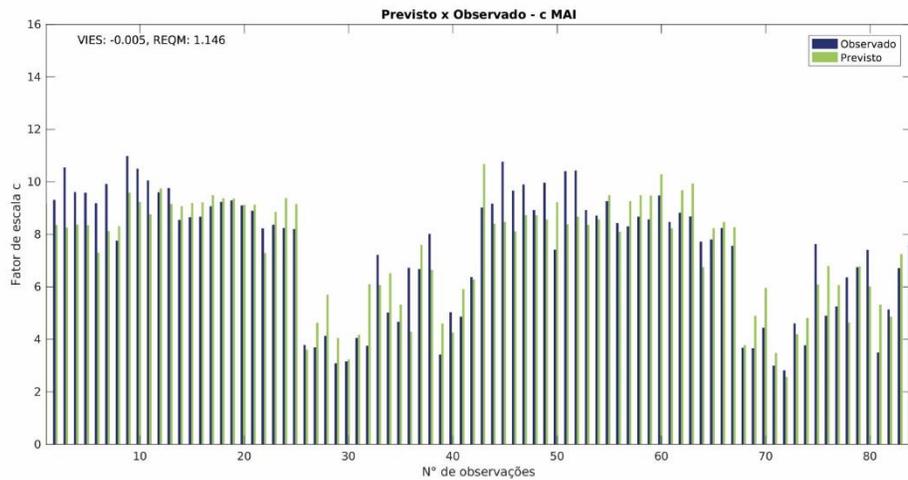
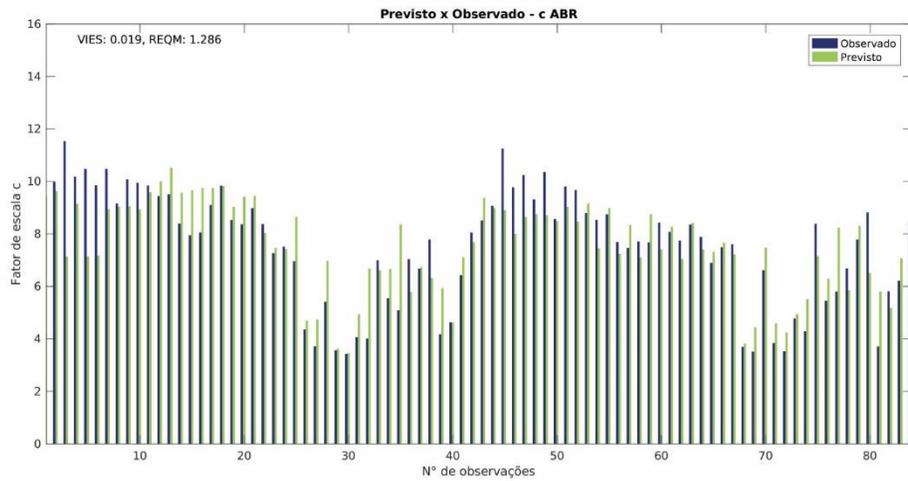
Continuação:



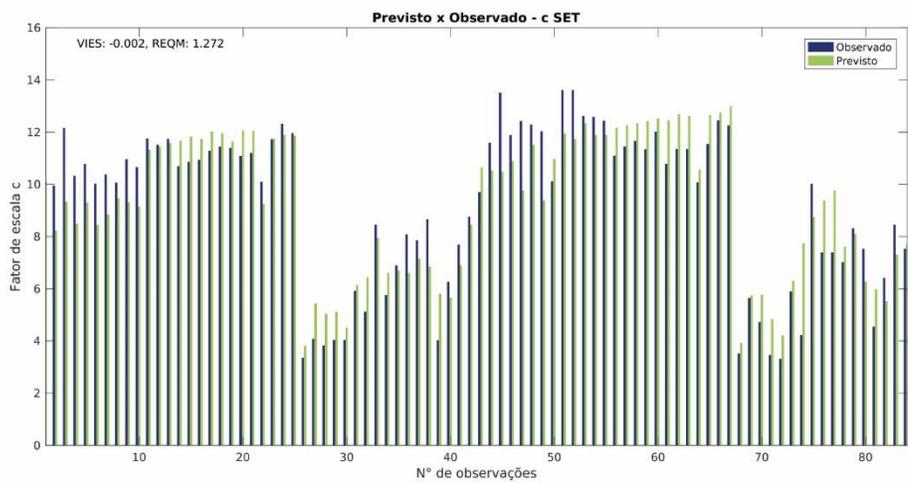
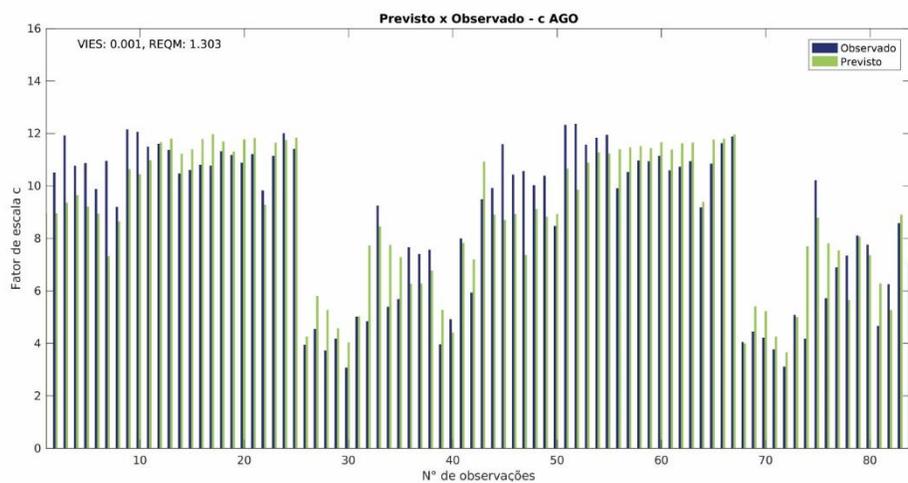
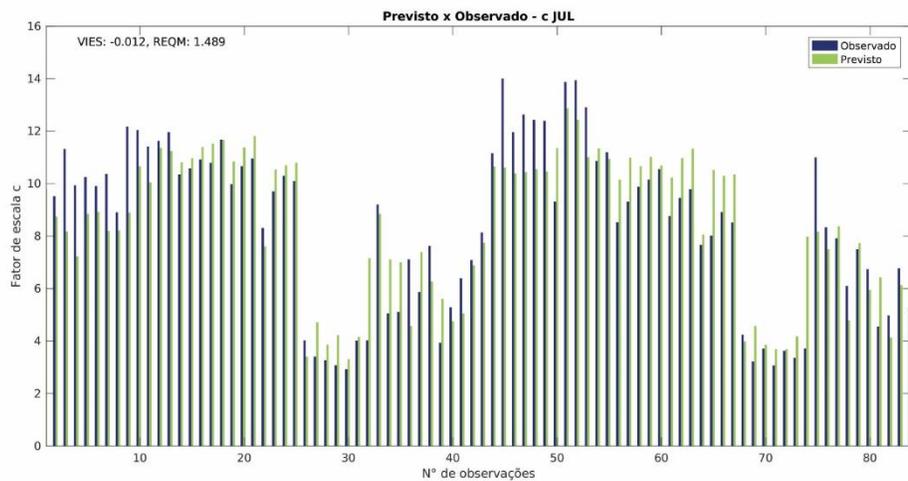
ANEXO 3: Erro de previsão – Fator de escala



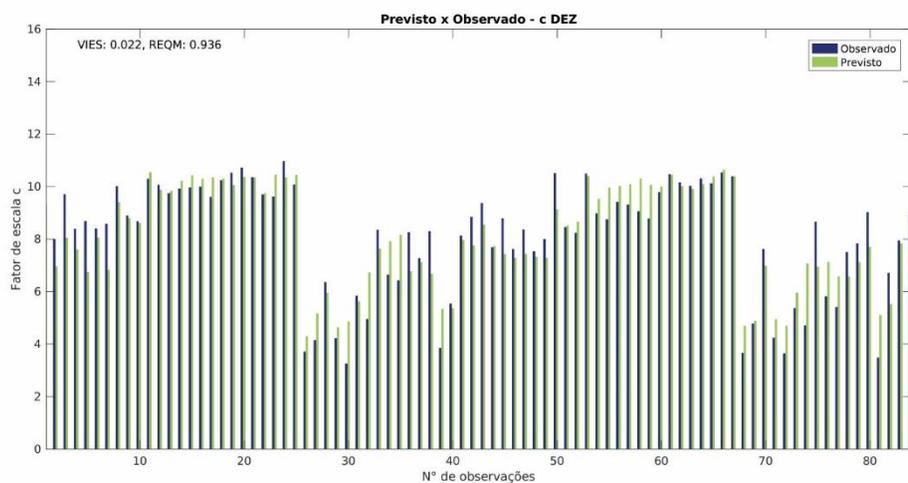
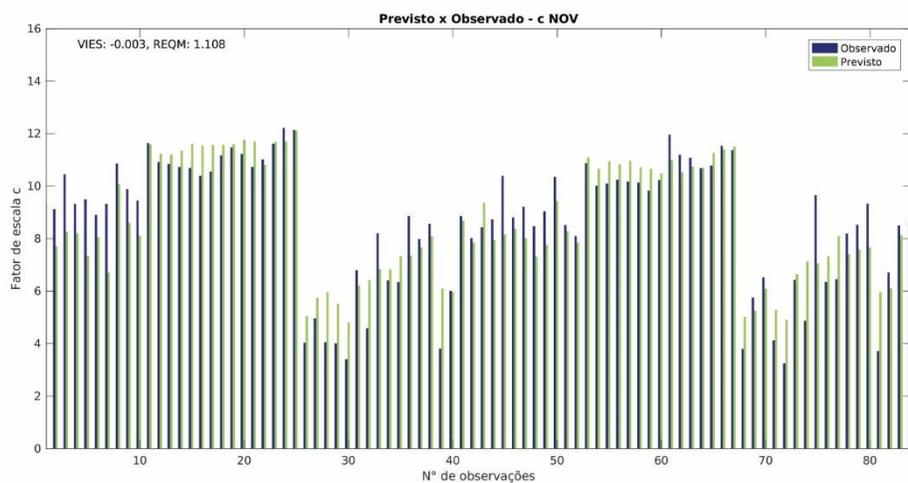
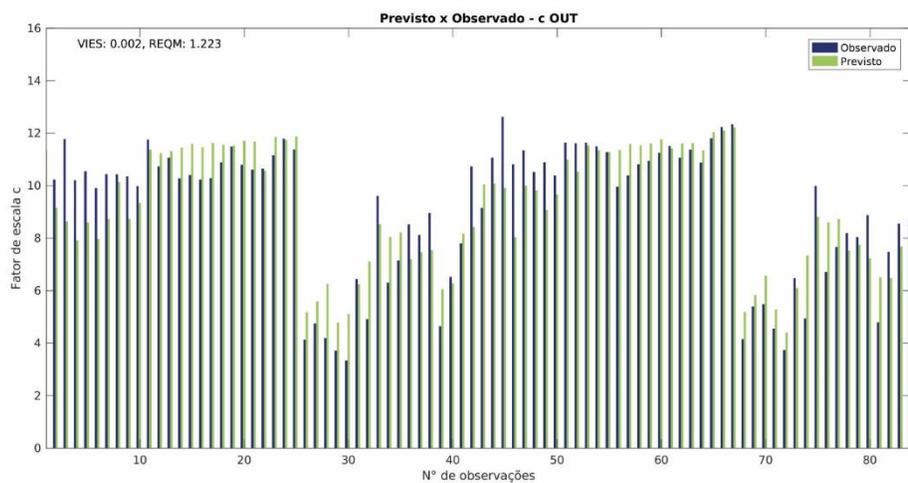
Continuação:



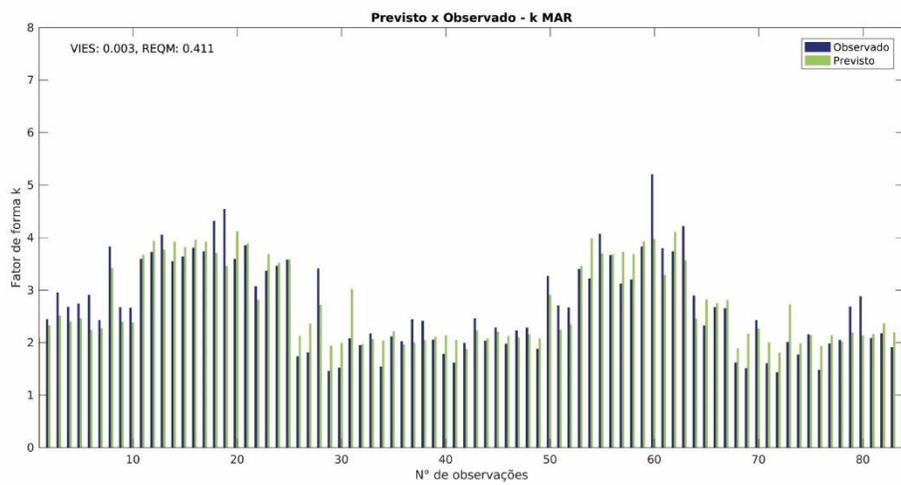
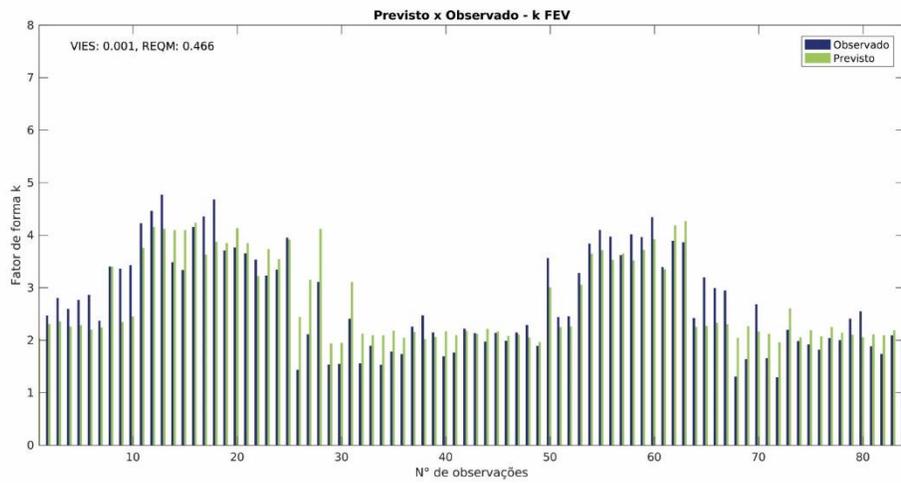
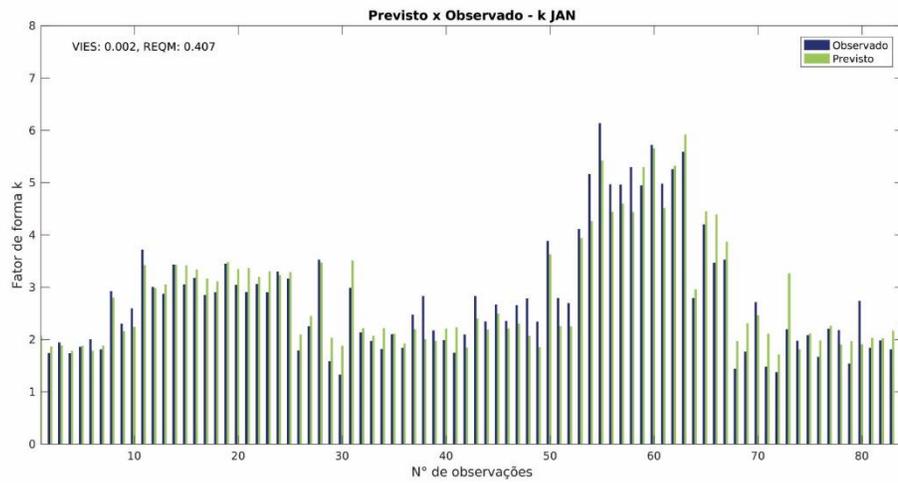
Continuação:



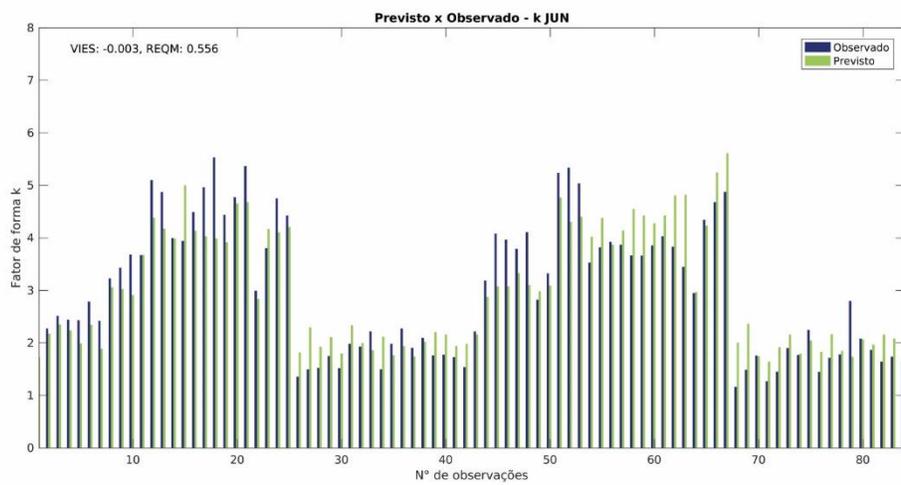
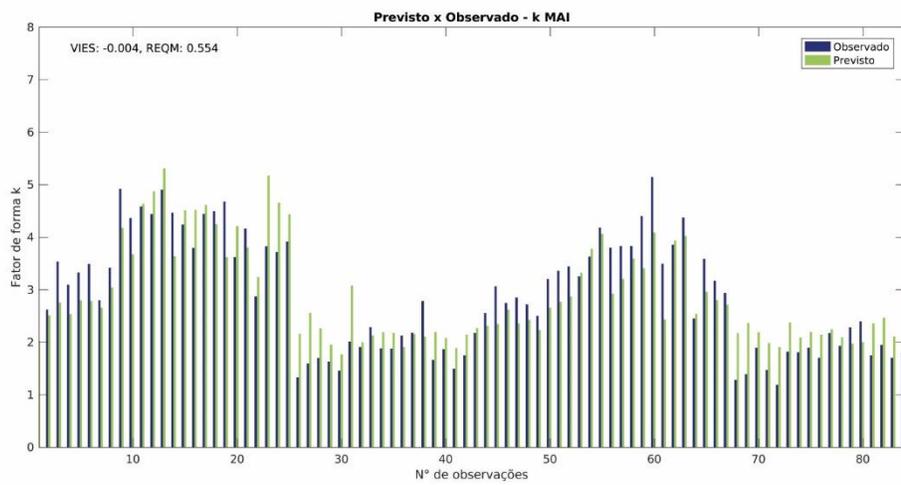
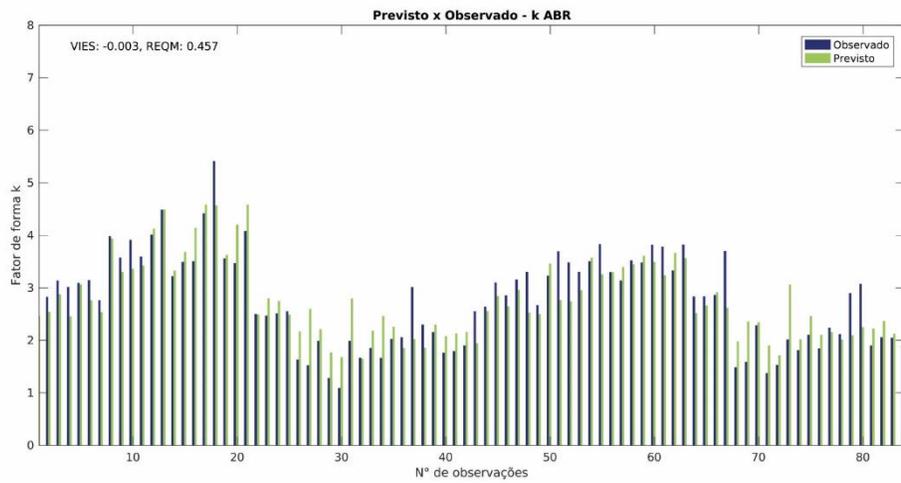
Continuação:



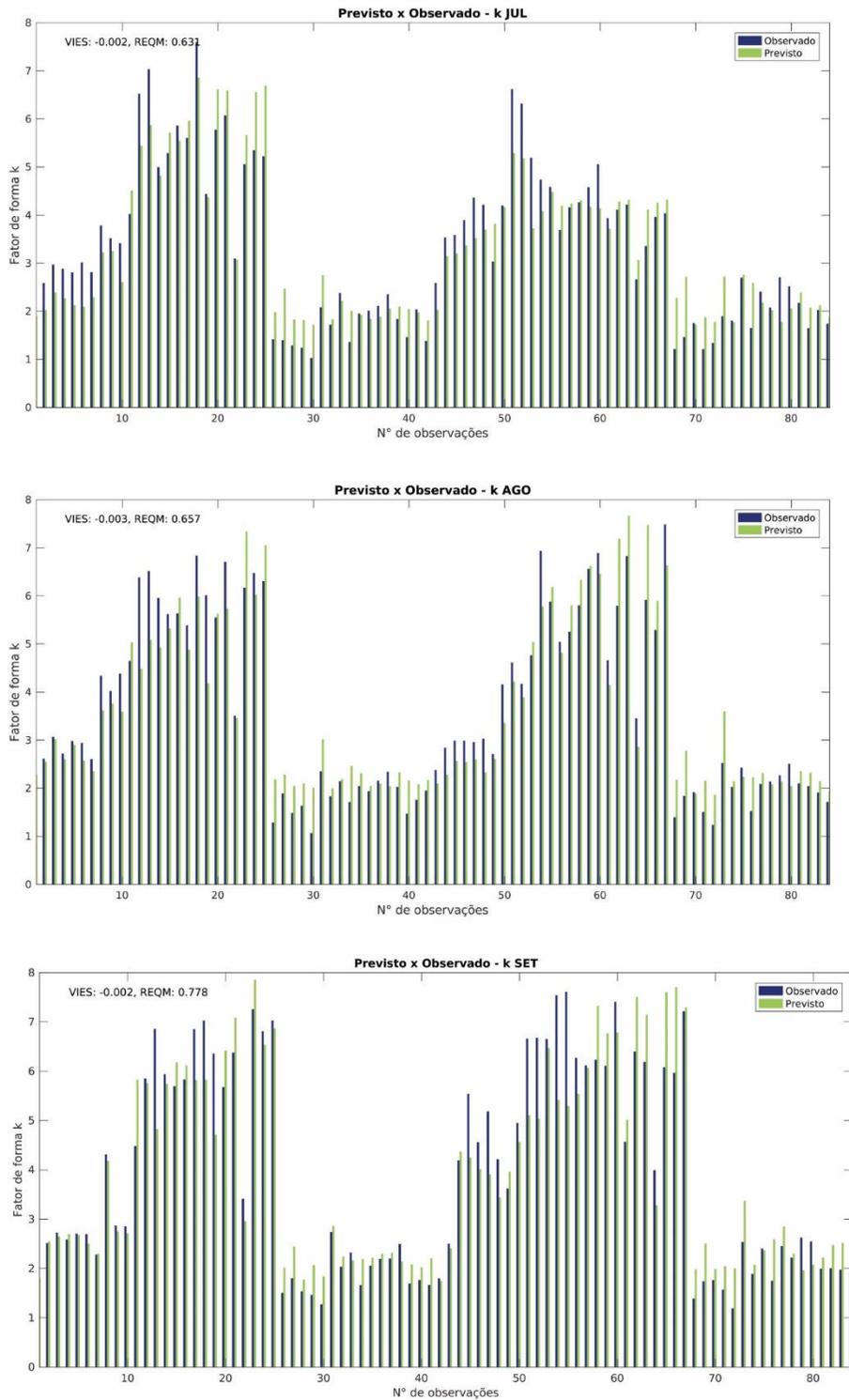
ANEXO 4 - Erro de previsão – Fator de forma



Continuação:



Continuação:



Continuação:

