



DESENVOLVIMENTO DE SERVIÇOS CLIMÁTICOS PARA ANÁLISE DE RISCO EM INFRAESTRUTURA DE LINHA DE TRANSMISSÃO EM SANTA CATARINA

Relatório 4/5 - Análise de Vento Extremo a Partir de Projeções de Modelos Climáticos Regionalizados (Eta-CPTEC)

Francisco Lima

Elaborado por: **Francisco Lima**

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 Madruça

EQUIPE TÉCNICA - GIZ

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

EQUIPE TÉCNICA - DEFESA CIVIL/ SANTA CATARINA

Flavio Rene Brea Victoria
Frederico Moraes Rudorff

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Chou Sin Chan

EQUIPE TÉCNICA - ELETROSUL

Diego Luis Tedesco Dandolini (coordenação)
André Luis Padovan
Jacira Prichula
Rogério Parrela de Amorim
Marisa Bender
Loriane Silveira

Giancarlo Maffezzoli
Mércio Antonio Pavanati
Marcelo Kotani
Julian Luis Reis
Claudia Teresa Pillatti
Raquel Carolina Chinchilla Cartagena

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

LISTA DE FIGURAS.....	4
LISTA DE TABELAS	7
1. INTRODUÇÃO.....	8
2. OBJETIVOS.....	11
2.2. Objetivos Específicos.....	11
3. MATERIAL E MÉTODO	12
3.1. Metodologia	12
3.2. Área de Estudo e Dados Observacionais	13
3.3. O Modelo Regional Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5.....	14
3.4. Remoção de Viés dos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5	15
3.5. Relação entre a Rajadas e a Velocidade de Vento Observado.....	16
3.6. Distribuição de Probabilidade de Frequência das Séries de Vento Máximo	21
3.6.1. Distribuição de Gumbel.....	22
3.6.2. Distribuição GEV	23
3.6.3. Distribuição Weibull.....	24
3.7. Período de Retorno – T.....	26
3.8. Índice FAR.....	27
4. RESULTADOS PERÍODO HISTÓRICO.....	28
4.1. Resultado das Avaliação dos Modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta- MIROC5.....	24
4.2. Resultados da correção do viés do modelo Eta.	29
4.3. Resultado da Relação entre a velocidade do vento média observado e a rajada do vento médio observados.....	34
4.4. Resultados do Período de Retorno – T da Rajada de Vento para o Modelo Eta (Período Histórico).....	43
4.5. Análise Espacial do Período de Retorno de 50 anos com as Distribuições GEV, Weibull e Gumbel para a Rajada do Vento Simulado pelo Modelo ETA	46
5. RESULTADOS DAS PROJEÇÕES.....	50
5.1. Resultado das Avaliação dos Modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 (Projeções)	50

5.2. Resultados da Rajada de Vento correspondente ao Período de Retorno – T da simulada pelo Modelo Eta (Projeções)	55
5.3. Análise Espacial da Diferença entre as Rajadas Máximas para o Período de Retorno de 50 anos do Período Histórico e das Projeções Simulado pelo Modelo ETA	58
6. CONCLUSÕES.....	.66
7. DISCUSSÕES SOBRE OS ANEXOS AO PRODUTO66
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fluxograma de execução das etapas adotado no desenvolvimento dos objetivos do projeto.....	10
Figura 2. Área de estudo e a localização das estações automáticas do INMET (identificados por pontos pretos) e METAR (identificados por pontos azuis).....	12
Figura 3. Dispersão entre os dados de velocidade e rajada do vento observado horários, a 10m de altura para as estações: a) Florianópolis, b) Indaial, c) Dionísio Cerqueira e d) Caçador.....	18
Figura 4. Dispersão entre os dados de velocidade (média de 10 minutos) e rajada do vento observado em intervalos horários a 10m de altura para todas as estações, ou seja, um único ajuste para todas estações.....	18
Figura 5. Uma ilustração das funções de densidade de probabilidade (PDFs) de uma variável climática (linha verde) e o efeito da influência humana sobre o clima (linha vermelha). As probabilidades correspondentes de exceder um limiar (P1 e P0) são representadas pelas áreas tracejadas da mesma cor. A linha vermelha tracejada ilustra como o PDF do mundo real pode variar com a mudança do clima.	23
Figura 6. Distribuições de probabilidade de frequência e probabilidade acumulada dos dados medidos e do modelo Eta-HADGEM2-ES, período histórico, para a velocidade do vento a 10m de altura.....	26
Figura 7. Distribuições de probabilidade de ocorrência e probabilidade acumulada dos dados medidos e do modelo Eta-MIROC5, período histórico, para a velocidade do vento a 10m de altura.....	28
Figura 8. Distribuições de probabilidade de frequência e probabilidade acumulada dos dados medidos e do modelo Eta-HADGEM-ES corrigido pela porcentagem da diferença dos parâmetros da distribuição de Weibull, período histórico, para a velocidade do vento a 10m de altura.....	30
Figura 9. Distribuições de probabilidade de frequência e probabilidade acumulada dos dados medidos e do modelo Eta-MIROC5 corrigido pela porcentagem da diferença dos parâmetros da distribuição de Weibull, período histórico, para a velocidade do vento a 10m de altura.....	32
Figura 10. Distribuições de probabilidade de frequência e probabilidade acumulada dos dados medidos de rajada de vento (em azul) e do modelo Eta-Hadgem2-ES (em laranja) estimados a partir da regressão linear mostrada na Figura 4, período histórico, para o vento a 10m de altura.....	35
Figura 11. Distribuições de probabilidade de frequência e probabilidade acumulada dos dados medidos de rajada de vento (em azul) e do	

modelo Eta-MIROC5 (em laranja) estimados a partir da regressão linear mostrada na Figura 4, período histórico, para o vento a 10m de altura.

Figura 12. Período de retorno da rajada máxima anual do vento para as simulações do período histórico do modelo Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5.....39

Figura 13. Rajada máxima anual do vento esperada para período de retorno de 50 anos para as simulações do período histórico do modelo Eta-HadGEM2-ES.....41

Figura 14. Rajada máxima anual do vento esperada para período de retorno de 50 anos para as simulações do período histórico do modelo Eta-MIROC5.....42

Figura 15. Rajada máxima anual do vento esperada para período de retorno de 50 anos segundo a NBR 5422.....42

Figura 16. Rajada máxima do vento simulado pelo modelo Eta-HadGEM2-ES43

Figura 17. Rajada máxima do vento simulado pelo modelo Eta-MIROC5.....43

Figura 18. Distribuições de frequência e probabilidade acumulada do modelo Eta- HADGEM2-ES de rajada de vento para o período BASELINE, em azul e projeções, em laranja, estação de Dionísio Cerqueira. (a) RCP4.5 (2006-2040), b) RCP4.5 (2040-2070), c) RCP4.5 (2070-2099), d) RCP8.5 (2006-2040), e) RCP8.5 (2040-2070), f) RCP8.5 (2070-2099)).....45

Figura 19. Distribuições de frequência e probabilidade acumulada do modelo Eta- MIROC5 de rajada de vento para o período BASELINE, em azul e projeções, em laranja, estação de Dionísio Cerqueira. (a) RCP4.5 (2006-2040), b) RCP4.5 (2040-2070), c) RCP4.5 (2070-2099), d) RCP8.5 (2006-2040), e) RCP8.5 (2040-2070), f) RCP8.5 (2070-2099))..... 46

Figura 20. Distribuições de frequência e probabilidade acumulada do modelo Eta- HADGEM2-ES de rajada de vento para o período BASELINE, em azul e projeções, em laranja, estação de Curitiba. (a) RCP4.5 (2006-2040), b) RCP4.5 (2040-2070), c) RCP4.5 (2070-2099), d) RCP8.5 (2006-2040), e) RCP8.5 (2040-2070), f) RCP8.5 (2070-2099))..... 47

Figura 21. Distribuições de frequência e probabilidade acumulada do modelo Eta- MIROC5 de rajada de vento para o período BASELINE, em azul e projeções, em laranja, estação de Curitiba. (a) RCP4.5 (2006-2040), b) RCP4.5 (2040-2070), c) RCP4.5 (2070-2099), d) RCP8.5 (2006-2040), e) RCP8.5 (2040-2070), f) RCP8.5 (2070-2099))..... 48

Figura 22. Período de retorno da rajada máxima anual do vento para as simulações do período histórico do modelo Eta-HadGEM2-ES (gráficos à

esquerda: a, b, c) e Eta- MIROC5 (gráficos à direita: d, e, f) para a estação de Dionísio Cerqueira para três períodos futuros (2006-2040, 2040-2070 e 2070-2099).....	50
Figura 23. Período de retorno da rajada máxima anual do vento para as simulações do período histórico do modelo Eta-HadGEM2-ES (gráficos à esquerda: a, b, c) e Eta- MIROC5 (gráficos à direita: d, e, f) para a estação de Curitiba para três períodos futuros (2006-2040, 2040-2070 e 2070-2099).....	50
Figura 24. Diferença da rajada máxima anual do vento para o período de retorno de 50 anos entre o clima atual (histórico) e futuro (RCP4.5), simulados pelo modelo Eta- HadGEM2-ES (mapas à esquerda) e Eta-MIROC5 ES (mapas à direita) para três períodos futuros (2006-2040, 2040-2070 e 2070-2099).....	52
Figura 25. Diferença da rajada máxima anual do vento para o período de retorno de 50 anos entre o clima atual (histórico) e futuro (RCP.85), simulados pelo modelo Eta- HadGEM2-ES (mapas à esquerda) e Eta-MIROC5 ES (mapas à direita) para três períodos futuros (2006-2040, 2040-2070 e 2070-2099).....	54
Figura 26. Diferença (RCP4.5 – Histórico) do 99 percentil (P99) da Rajada máxima do vento simulado pelo modelo Eta-HADGEM2-ES (mapas a esquerda) e pelo MIROC5 (mapas a direita) para três períodos futuros (2006-2040, 2040-2070 e 2070-2099)	56
Figura 27. Diferença (RCP8.5 – Histórico) do 99 percentil (P99) da Rajada máxima do vento simulado pelo modelo Eta-HADGEM2-ES (mapas a esquerda) e pelo Eta-MIROC5 (mapas a direita) para três períodos futuros (2006-2040, 2040-2070 e 2070-2099)	57
Figura 28. Mapa da variação do indicador de risco de mudanças climáticas FAR, simulado pelo modelo Eta-HadGEM2-ES (mapas a esquerda) e Eta-MIROC5 (mapas a direita) para o cenário RCP4.5 para três períodos futuros (2006-2040, 2040-2070 e 2070-2099), correspondente ao aumento na probabilidade da rajada de vento ultrapassar os 20 m/s.....	59
Figura 29. Mapa da variação do indicador de risco de mudanças climáticas FAR, simulado pelo modelo Eta-HadGEM2-ES (mapas a esquerda) e Eta-MIROC5 (mapas a direita) para o cenário RCP8.5 para três períodos futuros (2006-2040, 2040-2070 e 2070-2099), correspondente ao aumento na probabilidade da rajada de vento ultrapassar os 20 m/s	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Escala de vento de Beaufort.	9
Tabela 2. Velocidade máxima anual da rajada esperada para diversos períodos de retorno conforme simulado pelo modelo Eta-HadGEM2-ES.....	40

1. INTRODUÇÃO

A teoria dos valores extremos tem estado presente na literatura por um tempo já relativamente longo. Nesta última década do século XX, várias técnicas estatísticas desenvolvidas sob a denominação geral de teoria dos valores extremos, experimentaram uma aceitação prática crescente, especialmente nas áreas de mudanças climáticas e de finanças. Esta popularidade é muito devido à sua habilidade de melhor quantificar as probabilidades de ocorrência de eventos raros. As primeiras aplicações dos resultados formais da teoria dos valores extremos surgiram com a modelagem de fenômenos meteorológicos envolvendo precipitações máximas e níveis anuais de inundações nos Estados Unidos. Contudo, a abrangência de suas aplicações é grande, incluído uma variedade de fenômenos naturais tais como inundações, poluição atmosférica, correntes oceânicas, ventos extremos etc., e problemas oriundos de outras áreas tais como da engenharia e finanças (MENDES, 2004).

Intensos deslocamentos de massas de ar são um dos eventos naturais mais devastadores, as altas velocidades de vento associadas a esses deslocamentos ameaçam a integridade de estruturas como linhas de transmissão de energia, telhados de edificações, pontes, turbinas eólicas, antenas difusoras, entre outras. O correto dimensionamento destas estruturas depende da estimativa de frequência e magnitude de ventos extremos, de tal forma a garantir a segurança e a evitar o superdimensionamento. Devido aos danos aos habitat humanos e às infraestruturas causados por vendavais, análises de extremos de vento formam uma parcela essencial do processo de integração entre programas governamentais contra desastres naturais e objetivos gerais de desenvolvimento (GONÇALVES, 2007).

Estudos têm sido desenvolvidos para a identificação dos regimes de ventos, focados na sua variabilidade e em sua caracterização. Quanto a sua magnitude, é importante mencionar novamente, que ventos

extremos de grande magnitude impactam na produção eólica, nas linhas de transmissão de energia, dentre outras, podendo causar desgaste prematuro e danos estruturais. Assim sendo, também é fundamental identificar as características dos ventos extremos, tais como distribuição de frequência, valores máximos de vento, período de retorno, entre outras características, fornecendo aos tomadores de decisão mais subsídio para o planejamento estratégico referente à geração e distribuição de energia elétrica.

No Brasil, o cálculo do carregamento provocado pelo vento e da suportabilidade das estruturas de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica é regida pela normatização técnica NBR5422 (ABNT, 1985), que fixa as condições básica para o projeto das linhas aéreas de transmissão de energia elétrica de modo a garantir níveis mínimos de segurança e limitar perturbações em instalações próximas. A velocidade do vento considerada na NBR 5422 é a velocidade de uma rajada de 3s, com tempo de recorrência de 50 anos, medidas a 10 m de altura em relação a um terreno aberto plano.

Pesquisas publicadas recentemente sugerem que, devido às Mudanças Climáticas Globais (GILLILAND; KEIM, 2018; MARTINS; PEREIRA, 2011; PES et al., 2017), o regime de ventos de algumas regiões pode sofrer variações. Especificamente sobre eventos extremos de vento, Pes et al., (2017) mostraram indícios de alterações na frequência de ocorrência com base na avaliação de simulações de 45 anos do modelo Eta. Desta forma, a motivação para este trabalho é identificar quais regiões de Santa Catarina possuem a maior incidência de ventos extremos máximos e qual o período de retorno desses eventos; e se estão ocorrendo ou ocorrerão alterações na magnitude do vento máximo em detrimento as Mudanças Climáticas Globais.

Conhecer o regime de ventos extremos é um dos fatores a serem estudados, identificando a magnitude e frequência com que esses eventos ocorrem. Identificar as características dos ventos extremos

possibilita aos tomadores de decisão e administradores das linhas de transmissão mais subsídio para o planejamento de infraestruturas. Além disso, existem outras áreas de aplicações que dependem e podem se beneficiar dessas informações, tais como engenharia civil, agricultura, aeroportos, defesa civil entre outras (DUKES; PALUTIKOF, 1995; GONÇALVES, 2007; KATZ; PARLANGE; NAVEAU, 2002; SANSIGOLO, 2008a).

A Organização Meteorológica Mundial adota a escala de vento de Beaufort (Tabela 1) para associar a velocidade do vento a fenômenos meteorológicos. Essa escala foi sugerida por Francis Beaufort em 1805, para associar a agitação das águas do mar à velocidade do vento, e posteriormente foi adaptada para o vento no continente.

Tabela 1. Escala de vento de Beaufort.

Escala de Beaufort	Velocidade média do vento ms^{-1}	Limites da velocidade do vento ms^{-1}	Termo descritivo do vento
0	0	< 1	Calmaria
1	1	1-2	Aragem
2	3	2-3	Brisa leve
3	5	4-5	Brisa fraca
4	7	6-8	Brisa moderada
5	10	9-11	Brisa fresca
6	12	11-14	Brisa forte
7	15	14-17	Ventania fraca
8	19	17-21	Ventania
9	23	21-24	Ventania severa
10	27	25-28	Tempestade
11	31	29-32	Tempestade violenta
12	-	33+	Furacão

Fonte: Adaptado de Met Office. Disponível em:
<http://www.metoffice.gov.uk/weather/marine/guide/beaufortscale.html>

Este trabalho é parte do projeto “aprimoramento de serviços climático para investimentos em infraestrutura (CSI)” e visa fornecer informações sobre ameaça de vento extremo para a análise de risco climático para as linhas de transmissão da Eletrosul.

2. OBJETIVOS

O objetivo deste relatório é avaliar os valores extremos de vento para o período de retorno de 50 anos. A escolha do período de retorno de 50 anos é devido a (ABNT, 1985) que foi elaborada com base neste período, obtidos a partir de rodadas históricas e projeções futuras de modelos climáticos regionalizados (HadGEM2-ES e MIROC4) corrigidas por observações de superfície. Para tal serão utilizadas séries climatológicas de dados de vento do modelo Eta para identificar as características dos ventos extremos em Santa Catarina, na Região Sul do Brasil, a fim de gerar conhecimento científico que auxilie no planejamento de projetos em infraestruturas de linhas de transmissão.

As principais aplicações que justificam o interesse na análise de ventos extremos usando modelos de projeções futuras é a baixa densidade de dados de ventos observados no Brasil, em especial no Estado de Santa Catarina. Uma avaliação do quanto o clima futuro afetaria as linhas aérea de transmissão de energia elétrica ajudam a detalhar os critérios de severidade de vento que devem ser usados para garantir a segurança das edificações e das torres de distribuições de energia em complemento aos requisitos impostos pelas normas técnicas brasileira, também será apresentado.

2.2. Objetivos Específicos

Na Figura 1, tem-se um fluxograma resumido das etapas descrita abaixo. Este relatório envolve as seguintes etapas de execução:

- Avaliação do modelo Eta em comparação aos dados medidos do INMET e METAR;
- Correção estatística do viés (temporal e espacial) com base na diferença entre os parâmetros da distribuição de Weibull dos dados observacionais e dos dados do modelo Eta, bem como a validação da metodologia;
- Avaliação de uma técnica estatística (regressão linear) que

relacione o valor de velocidade do vento médio (horário) com a rajada do vento (horário) dos dados observacionais. E com isso, aplicaremos a técnica para estimar a rajada máxima diária no período histórico e nas projeções do modelo Eta;

- Cálculo dos parâmetros das distribuições de frequências a partir dos dados de projeção do modelo Eta;
- Obtenção dos valores extremos máximos de vento e rajada para períodos de retorno de 50 anos a partir das projeções do modelo Eta, representativos para o estado de Santa Catarina;
- Cálculo e mapas de alterações de risco futuro (índice FAR) associado a estes eventos para o estado de Santa Catarina.

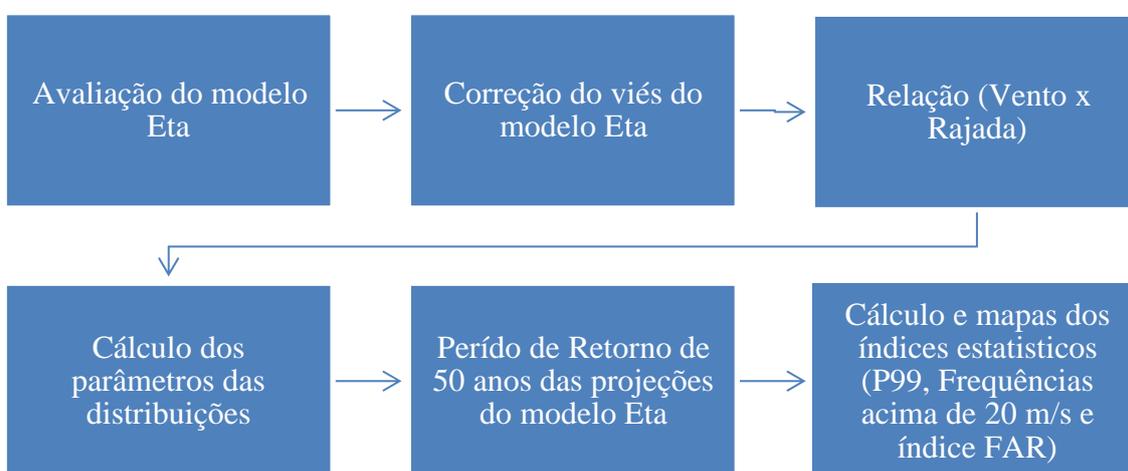


Figura 1. Fluxograma de execução das etapas adotado no desenvolvimento dos objetivos do projeto.

3. MATERIAL E MÉTODO

3.1. Metodologia

Para o estudo de ventos extremos, serão utilizadas séries climatológicas de vento em superfície ao nível de 10 metros, com séries históricas de dados superiores a trinta anos registradas no aeroporto de Florianópolis, bem como estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET distribuídas em todo o Estado de SC.

A primeira etapa consiste em corrigir o modelo Eta-HadGEM2 para o

período *baseline* entre 1961 e 2005. O modelo foi rodado com as condições de contorno dos modelos globais HadGEM2-ES e MIROC5. Foram gerados mapas contendo valores extremos de vento para o período de retorno de 50 anos obtidos a partir de rodadas históricas do modelo Eta corrigidas por observações de superfície.

Na segunda etapa, foram utilizados os resultados das estatísticas obtidas na primeira etapa para os cenários futuros de vento, obtendo assim séries futuras para cada uma das estações em particular, e mapas de tendência e frequência de vento. Isto é, a segunda etapa aborda a análise dos resultados da aplicação dos valores externos de vento para períodos de retorno de 50 anos em cenários de mudanças climáticas futuras e mapas de alterações de risco futuro (índice FAR) para o Estado de Santa Catarina.

Para o estudo de ventos extremos máximo simulados em escala temporal diária, foram utilizadas simulações climáticas provenientes do modelo Eta-HadGEM2-ES e Eta- MIROC5 referentes ao clima presente (1961-2006) e clima futuro (2006-2100) para os cenários de concentração intermediária-baixa (RCP4.5) (cenário otimista) e de alta concentração (RCP8.5) (cenário pessimista), ambos utilizados na realização deste produto. As integrações do clima futuro usados no modelo são baseadas nos caminhos representativos de concentração dos Gases do Efeito Estufa (GEE) e suas forçantes radiativas no clima, nomeados de *Representative Concentration Pathway* (RCP) (MOSS et al., 2010). Os valores seguidos da sigla "RCP" (4.5 e 8.5) indicam o nível de concentração das forçantes radiativas, dada em W/m^2 .

3.2. Área de Estudo e Dados Observacionais

Na região Sul e Sudeste do Brasil o regime dos ventos próximos à superfície é influenciado pelo Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), pela entrada de massas de ar e a Depressão do Nordeste da Argentina – centro de baixa pressão a leste dos Andes. Devido às

variações de mesoescala e microescala que ocorrem em função das propriedades da superfície, o perfil de vento em superfície pode ser influenciado, criando condições de ventos locais que podem diferir significativamente do perfil de larga escala da circulação atmosférica (COMPAGNUCCI; SALLES, 1997; MINISTÉRIO DE MINAS ENERGIA, 2001).

Os dados utilizados neste trabalho, para a validação do modelo Eta, serão observações médias horárias de velocidade do vento para um período de nove anos, compreendendo janeiro de 2009 a dezembro de 2017, coletados em estações meteorológicas automáticas de superfície operadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Uma outra fonte de dados observacionais utilizados nesse trabalho, foram dados pertencentes ao Instituto de Controle do Espaço Aéreo (DECEA). A localização das estações utilizadas pode ser verificada na Figura 2.

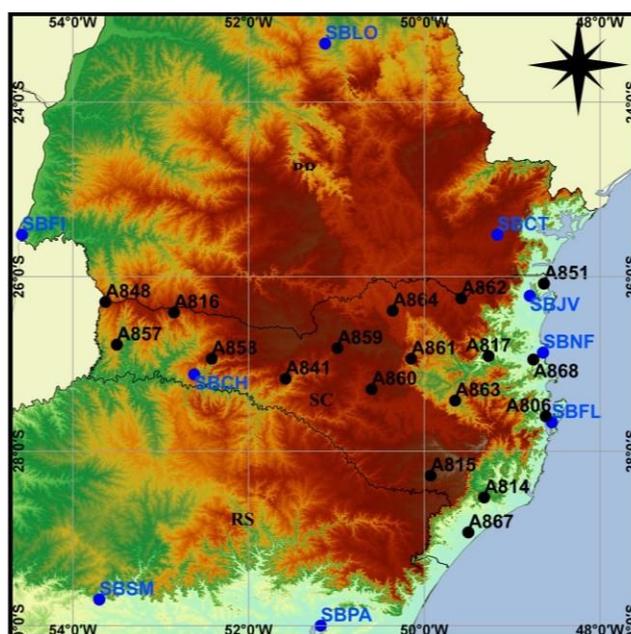


Figura 2. Área de estudo e a localização das estações automáticas do INMET (identificados por pontos pretos) e METAR (identificados por pontos azuis).

3.3. O Modelo Regional Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5

O modelo Eta foi desenvolvido, em 1970, pela Universidade de Belgrado em parceria com o Federal *Hydrometeorological Institute*, da Iugoslávia para previsão numérica de tempo. O modelo tornou-se

operacional na Iugoslávia em 1978 e posteriormente a coordenada eta foi criada por MESINGER (et al., 1988) para reduzir os erros cometidos pela coordenada sigma anteriormente proposta. O desenvolvimento posterior do modelo contou com esforços de numerosos cientistas, muitos deles do *National Meteorological Center* (atual *National Centers for Environmental Prediction* - NCEP) (BLACK, 1994; MESINGER et al., 1988). O modelo de área limitada Eta tem sido utilizado operacionalmente no Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) desde 1996 (CHOU et al., 2012, 2014a, 2014b).

O modelo regional se propõe a prever, com maiores detalhes, sistemas organizados em mesoescala, tais como fenômenos associados a frentes, orografia, brisa marítima, tempestades severas. A resolução horizontal atual utilizada na América do Sul é de 20 km e a vertical de 38 níveis, no entanto já existem versões com resolução horizontal de 5 km e 60 níveis verticais usados para regiões menores, como ao longo da costa Sudeste do Brasil e em Santa Catarina. As variáveis prognósticas do modelo são: temperatura do ar, componente zonal e meridional do vento, umidade específica, hidrometeoros de nuvens, pressão à superfície e energia cinética turbulenta.

Os dados de modelo utilizados são provenientes do modelo regional Eta 20 km, sobre Santa Catarina, rodado com as condições de contorno dos modelos globais HadGEM2 e MIROC5, desenvolvido por (CHOU et al., 2012) no Centro de Previsão de Tempos e Estudos Climáticos – CPTEC. As integrações do clima futuro realizadas com este modelo são baseadas nos caminhos representativos de concentração dos Gases do Efeito Estufa (GEE) e suas forçantes radiativas no clima, nomeados de *Representative concentration Pathway* (RCP) (MOSS et al., 2010). Foi considerado um cenário de concentração intermediária (RCP4.5) e uma de alta concentração (RCP8.5), ambos utilizados na realização deste trabalho.

O modelo global HadGEM2-ES (*Hadley Centre Global Environmental*

Model version 2 Earth System) (COLLINS et al., 2011) é um modelo em ponto de grade com resolução N96, equivalente a 1,875 e 1,275 graus de longitude e latitude, respectivamente, e 38 níveis verticais na atmosfera, chegando a cerca de 40 km de altitude. O HadGEM2-ES foi aplicado pelo *Met Office Hadley Centre* nas simulações do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5)* (STOCKER et al., 2013), que utiliza dados históricos de 1960 a 2005 e projeções através dos chamados RCPs (*Representative Concentration Pathways*) (MOSS et al., 2010).

O *Model for Interdisciplinary Research on Climate (MIROC5)* (WATANABE et al., 2010), por sua vez, foi desenvolvido em conjunto pelo *National Institute of Environmental Studies (NIES)*, *Center for Climate System Research (CCSR)* e *Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)*, sendo essa versão utilizada no Quinto Relatório de Avaliação (AR5) do *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* (IPCC 2013, 2013).

O modelo climático que produziu os dados utilizados neste produto foi o Eta. Dessa forma, o modelo Eta é modificado para realizar integrações decadais de longo termo e reproduz o clima entre 1961 e 2005, clima presente, (CHOU et al., 2012b; PESQUERO et al., 2010). O modelo Eta foi configurado para o prazo de integração de 45 anos e gerou séries temporais com frequência de saída de três horas. A resolução horizontal é de 20 km (CHOU et al., 2012b, 2014b, 2014a; LYRA et al., 2018). Estas simulações e projeções do clima futuro foram utilizadas pelo (MCTI - MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, 2016) e têm sido usadas para dar suporte em diversos estudos de impactos (TAVARES et al., 2018; VIOLA et al., 2015). A versão do modelo utilizado na realização deste relatório consiste no modelo climático regional Eta aninhado aos modelos climáticos globais HadGEM2-ES e MIROC5, para o período histórico e as projeções futuras, na resolução de 20 km.

3.4. Remoção de Viés dos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5

Os modelos numéricos possuem um conhecido viés na simulação da velocidade do vento, causados pelas simplificações do modelo e das parametrizações dos processos atmosféricos e das condições iniciais. Estas limitações resultam em erros sistemáticos mais altos que as incertezas de velocidade de vento observados em estações meteorológicas. Este foi um dos fatores que motivaram esta etapa, uma vez que refinamentos e a obtenção de simulações com menores erros são necessários para diversas aplicações.

No produto 03 descrito em LIMA, 2019 foi feita uma correção estatística com base em uma adaptação da metodologia de “mapeamento de quantis” da função de distribuição acumulada (HASHINO; BRADLEY; SCHWARTZ, 2007; SCHAAKE et al., 2007; WOOD; SCHAAKE, 2008). Porém a correção foi feita pontual e nos dados diários, visando uma correção espacial e temporal mais robusta que a anterior, além de fazer uma correção nos dados horários do modelo, optou-se por uma nova metodologia descrita abaixo.

Portanto, os dados de velocidade de vento, do modelo Eta foram corrigidos com base nos parâmetros da distribuição de Weibull, ou seja, foi extraído uma série temporal do modelo Eta, para cada latitude e longitude onde estão localizadas as estações meteorológicas, e com isso foram calculados os parâmetros c e k dos dados simulados e observados. Foi calculada a diferença entre os parâmetros simulados e observados e convertida em porcentagem. A partir desta diferença percentual dos parâmetros c e k foi gerado um mapa de correção a partir de uma interpolação linear dos parâmetros e aplicada a correção em toda a grade do modelo para o 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 a saída do Eta, assegurando a variabilidade horária, diária e interanual realista, foi implementada a correção descrita acima, que é uma abordagem baseada na correção

de uma CDF, onde corrige-se a frequência do vento. Como resultado desse processo, a técnica removeu o viés nas simulações do Eta. Como todas as abordagens de *downscaling* estatístico, supõe-se que os viés em relação as simulações históricas serão constantes no período futuro da projeção (THRASHER et al., 2012).

O princípio do método consiste na utilização de função de distribuição acumulada de velocidade do vento para identificar a diferença sistemática entre os parâmetros observados e os parâmetros simulados dentro de um determinado período no passado, e posteriormente, corrigir estas diferenças na velocidade do vento das projeções climáticas. O método de correção tende a reduzir significativamente o erro sistemático inerente no modelo Eta.

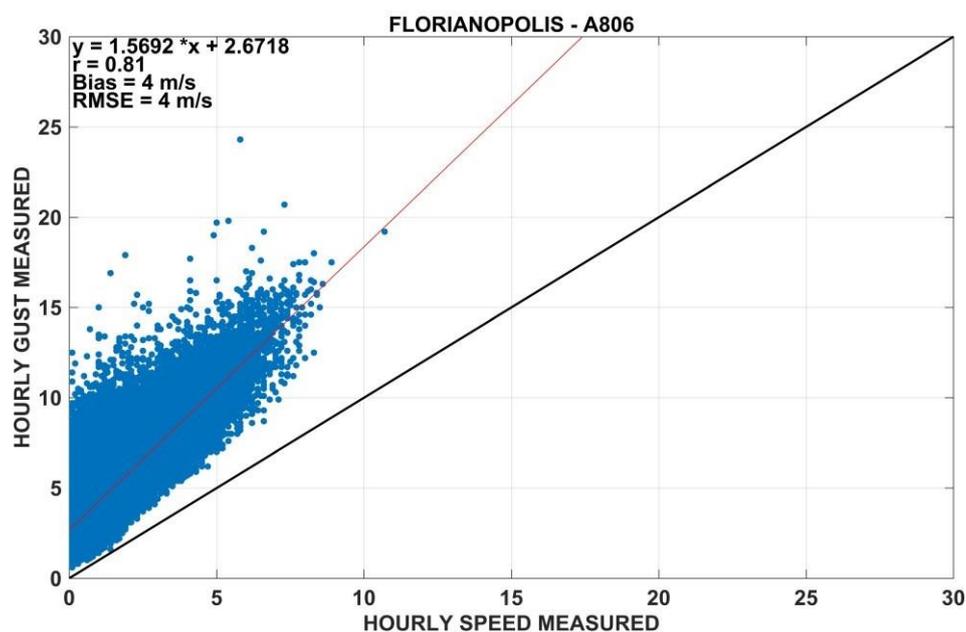
3.5. Relação entre a Rajadas e a Velocidade de Vento Observado

Como já discutido anteriormente os modelos atmosféricos de mesoescala possuem limitações, associadas principalmente às parametrizações de processos sub-grade e às imperfeições nas condições iniciais e no equacionamento, que somado a restrição no intervalo de integração de seu núcleo dinâmico, impede que se detecte rajadas de vento na escala de poucos segundos. Por esta razão é necessário estimar as intensidades de rajada a partir do vento médio calculado pelo modelo.

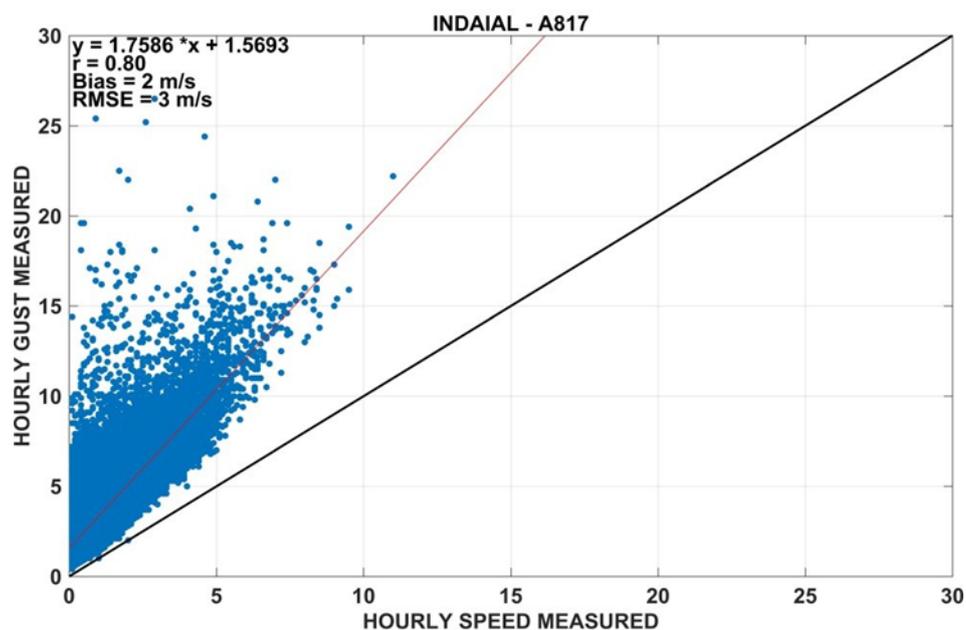
Neste tópico é mostrada a metodologia usada para encontrar uma relação entre a rajada máxima diária e a velocidade máxima diária do vento observado. Uma relação linear entre as variáveis é mostrada nos gráficos abaixo, a qual foi aplicada aos dados do modelo Eta. Verifica-se na Figura 3 a existência de uma relação linear entre as duas variáveis (velocidade vs rajada), embora a dispersão dos dados seja grande. Para uma melhor abordagem dos resultados foram mostrados os gráficos apenas para as estações de Florianópolis, Indaial, Dionísio Cerqueira e Caçador. As demais estações se encontram em anexo ao relatório. Observa-se ainda que, na Figura 4, temos um único ajuste

para todas as estações do INMET. O objetivo é usar um único ajuste, ou seja, uma única regressão que represente todas as estações, e conforme apresentado nos gráficos a seguir, opção foi considerada satisfatória e desta forma, foi utilizado nos resultados deste produto.

a)



b)



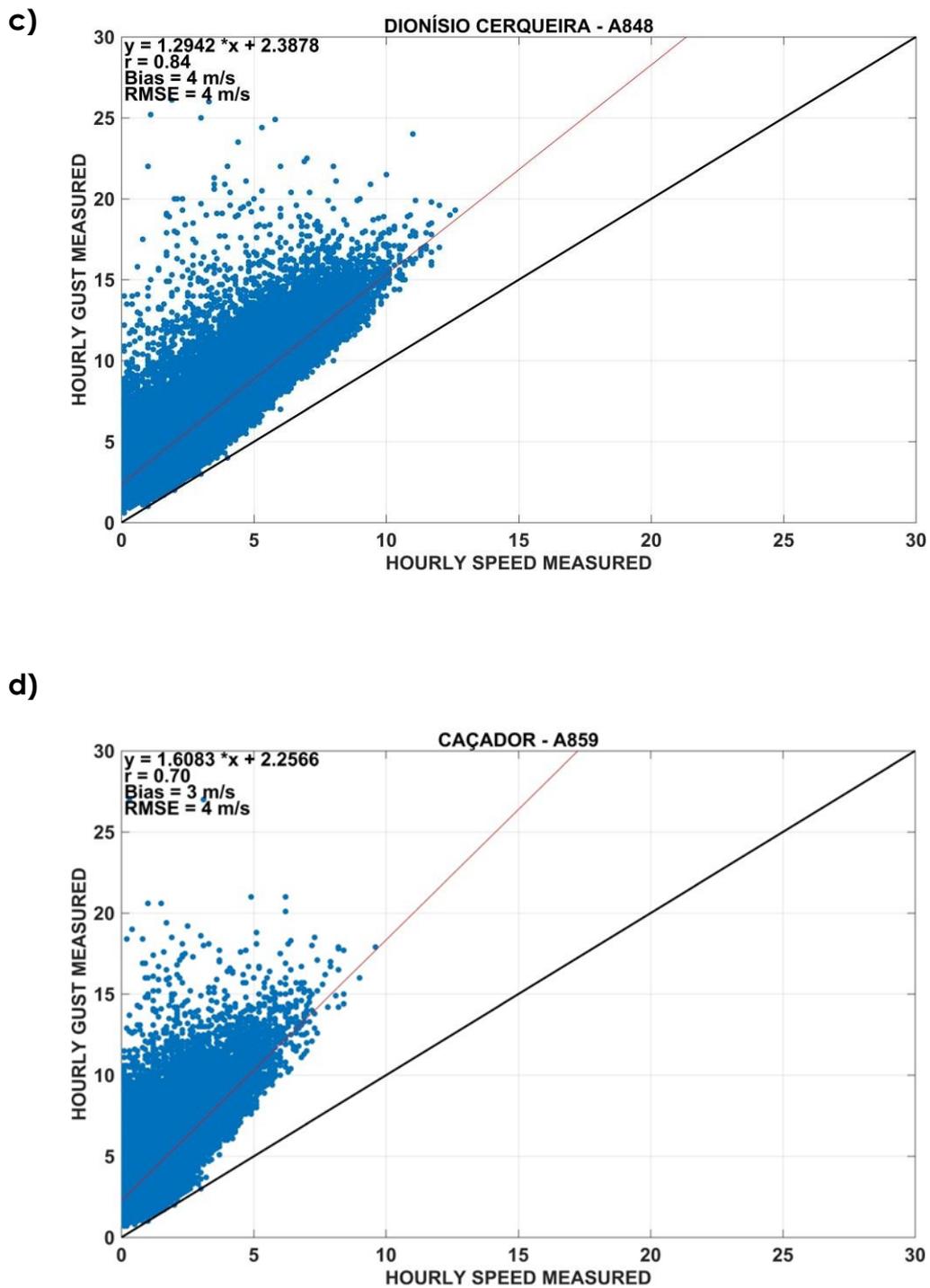


Figura 3. Dispersão entre os dados de velocidade e rajada do vento observado horários, a 10m de altura para as estações: a) Florianópolis, b) Indaial, c) Dionísio Cerqueira e d) Caçador.

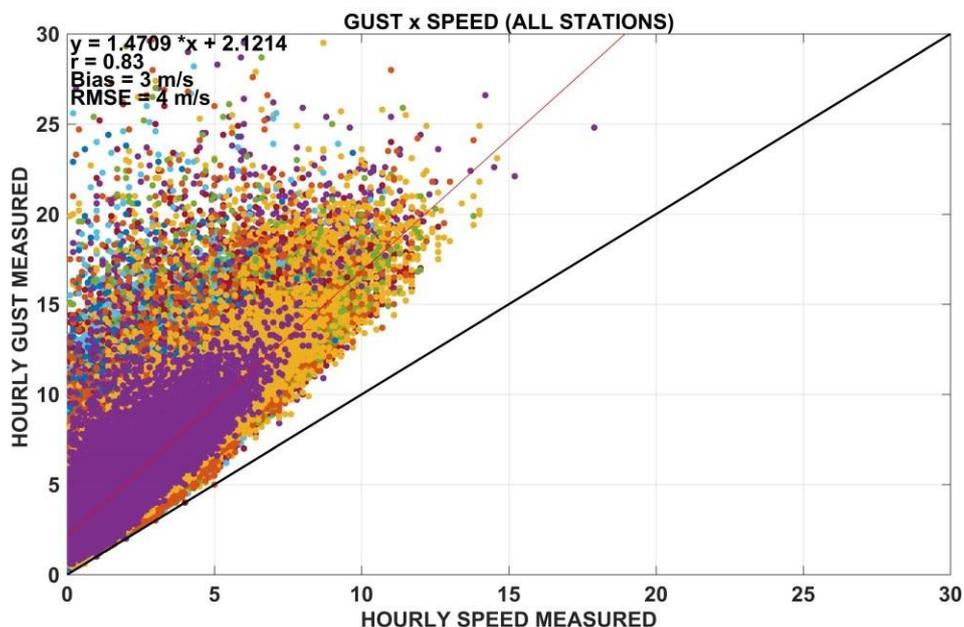


Figura 4. Dispersão entre os dados de velocidade (média de 10 minutos) e rajada do vento observado em intervalos horários a 10m de altura para todas as estações, ou seja, um único ajuste para todas estações.

3.6. Distribuição de Probabilidade de Frequência das Séries de Vento Máximo

A análise de valores extremos é empregada rotineiramente para estudo de enchentes, ciências ambientais, finanças e seguros (REISS; THOMAS, 2007). Diferentes métodos de distribuição de probabilidade de eventos extremos são utilizados atualmente para dados observados, e causam discussões entre os estatísticos de qual seria o melhor método a ser empregado. No entanto, alguns deles estão bem consolidados na bibliografia e geram resultados satisfatórios quando comparados entre si.

Alguns autores consideram que o método de análise de extremos mais indicado é a distribuição GEV (*Generalized Extreme Value*) que considera três diferentes métodos de distribuição: Gumbel, Fréchet e Weibull.

Já (Hershfield; cKohler, 1960) analisando os dados de milhares de

estações pluviométricas nos Estados Unidos, concluíram que a distribuição de GUMBEL, (1954) é a mais adequada para estimar as probabilidades de ocorrência de eventos extremos de precipitação de diversas durações. Ainda, o trabalho publicado por (Sansigolo, 2008) mostrou que o método de distribuição que mais se ajustou aos dados de vento foi a distribuição de Weibull (WEIBULL, 1951).

Dessa forma, com base nas diferentes bibliografias consultadas, serão adotados os três métodos que mais se ajustam ao estudo de ventos extremos, e aplicados para analisar os dados simulados pelos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 e comparado com os dados observados das estações meteorológicas do INMET, METAR e DECEA. Para obter as funções de distribuições de probabilidade (PDF) foram usados os modelos de Gumbel, Weibull e GEV. A determinação dos parâmetros das distribuições foi obtida através do método da máxima verossimilhança (REISS; THOMAS, 2007).

3.6.1. Distribuição de Gumbel

A distribuição de Gumbel pode ser descrita como uma função de densidade de probabilidade, da seguinte forma:

$$f(x) = \frac{1}{\beta} e^{-\frac{x-\alpha}{\beta}} e^{-e^{-\frac{x-\alpha}{\beta}}} \quad (01)$$

e a função cumulativa de probabilidade (CDF) é dada por

$$F(x) = e^{-e^{\pm \frac{x-\alpha}{\beta}}} \quad (02)$$

$$X(F) = \alpha - \beta \ln(-\ln F) \quad (03)$$

onde α e β são os parâmetros de posição e escala, respectivamente. O sinal de mais e menos no segundo expoente é referente aos sinais de máximo (positivo) e mínimo (negativo) dos valores extremos.

3.6.2. Distribuição GEV

A distribuição de probabilidade generalizada de valores extremos (GEV) foi introduzida por (JENKINSON, 1955). Esse método combina os três possíveis tipos de distribuição de valores extremos em uma única forma, vem sendo utilizada para representar a distribuição de valores extremos em diferentes campos principalmente para modelar uma extensa variedade de extremos naturais, como cheias, chuvas, velocidade do vento, temperaturas e outros extremos (QUEIROZ; CHAUDHRY, 2006).

Segundo (SANSIGOLO, 2008b) a teoria GEV, fundamental para a modelagem de eventos extremos, foi desenvolvida por Fisher e Tippett, (1928), que definiram os três tipos possíveis de distribuições assintóticas de valores extremos, conhecidas como de Gumbel (Tipo I), Fréchet (Tipo II) e Weibull (Tipo III), casos especiais da Distribuição Generalizada de Valores.

$$F(x) = \exp \left[- \left(1 - k \frac{x-\alpha}{\beta} \right)^{\frac{1}{k}} \right] \text{ para } k \neq 0 \quad (04)$$

$$F(x) = \exp \left[- \exp \left(- \frac{x-\alpha}{\beta} \right) \right] \text{ para } k \equiv 0 \quad (05)$$

sendo,

$-\infty < x < +\infty, k = 0$
(Gumbel)

Distribuição tipo I

$\varepsilon \leq x < +\infty, k < 0$
(Fréchet)

Distribuição Tipo II

$-\infty < x \leq \omega, k > 0$
(Weibull)

Distribuição Tipo III

A distribuição generalizada de valores extremos (GEV) de três parâmetros: α parâmetro de posição com $-\infty < \alpha < +\infty$, β parâmetro de escala com $0 < \beta < +\infty$ e k parâmetro de forma com $-\infty < k < +\infty$.

Quando $k > 0$, o limite superior da distribuição assintótica Tipo III torna-se $\omega =$

$\alpha + \frac{\beta}{k}$, e quando $k < 0$ o limite inferior da distribuição assintótica Tipo II

torna-se $\varepsilon =$

$\alpha + \frac{\beta}{k}$

O p -ésimo quantil da distribuição GEV é dado pela seguinte relação, decorrente da Equação 01:

$$X(F) = \alpha + \frac{\beta}{k} [1 - (-\ln(p))^k], \quad 0 < p < 1 \quad (06)$$

Combinando a distribuição de Gumbel com a sua variável reduzida z (DE QUADROS; DE QUEIROZ; BOAS, 2011), temos:

$$z = \frac{(x-\alpha)}{\beta} \quad (07)$$

Obtendo-se $F(x) = \exp[-\exp(-z)]$ que resulta na equação:

$$z = \ln[-\ln(F(x))] \quad (08)$$

Assim a Função 05 pode ser usada para definir z com respeito às distribuições Tipo I, II e III. Em um gráfico de intensidade z versus x , pode-se observar o comportamento das três formas de distribuição de valores extremos.

3.6.3. Distribuição Weibull

A distribuição de Weibull é amplamente usada no setor de energia eólica para avaliar a viabilidade do vento na geração de energia elétrica (ANGELI SANSIGOLO, 2005; VAN DER AUWERA; DE MEYER; MALET, 1980). Essa distribuição fornece dois parâmetros denominados parâmetro de forma k e um fator de escala β .

A partir dos dados de velocidade do vento são determinados histogramas expressando as frequências de ocorrência de cada faixa de velocidade. Os histogramas permitem estimar o potencial de geração de energia do sítio eólico. A forma geral para a distribuição de Weibull é a seguinte:

$$f(x) = \frac{k}{\beta} \left(\frac{x}{\beta}\right)^{(k-1)} e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^k} \quad (09)$$

e sua forma como função de densidade de probabilidade acumulada é dada por:

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left\{\frac{(x-\alpha)}{\beta}\right\}^k\right], \quad \alpha \leq x < \infty \quad (10)$$

O quantil da distribuição de Weibull é dado por:

$$X(F) = \alpha + \beta[-\ln(1 - F)]^{\frac{1}{k}} \quad (11)$$

Onde x representa a velocidade do vento. Os fatores de escala β e o de forma k são os parâmetros que estão relacionados, respectivamente à velocidade média do vento e à forma da curva (MARTINS; GUARNIERI; PEREIRA, 2008).

3.7. Período de Retorno – T

Um dos maiores objetivos da análise de valores extremos é a estimação do período de retorno T (REISS; THOMAS, 2007), sendo ele o período de tempo médio em que um determinado evento é igualado ou superado pelo menos uma vez. Esse parâmetro estatístico é empregado no estudo de eventos extremos, amplamente utilizado em hidrologia, principalmente na prevenção de inundações.

A análise de período de retorno é mais interessante se as observações forem feitas em intervalos equidistantes de tempo, como é o caso da meteorologia estatística. Dessa forma, o tempo de retorno são tempos, e para observações anuais, número de anos (GUMBEL, 2004). Seja x um evento e T o tempo entre os eventos consecutivos x , o valor médio da variável T é denominado período de retorno da variável x .

O período de retorno é determinado através da seguinte função:

$$T(x) = \frac{1}{1-P(x)} \quad (12)$$

Onde P é a probabilidade de um valor qualquer de uma variável x ocorrer novamente ou ser superada ao menos uma vez.

3.8. Índice FAR

O Conceito de *Fraction Attributable Risk* (FAR) foi primeiro aplicado em 2004 (STOTT et al., 2016), em uma análise de onda de calor na Europa. Esta foi a primeira instância de atribuição de um evento fornecendo uma ligação direta entre mudança climática antropogênica e um evento climático extremo. Para obter este resultado, a probabilidade (P_1) de um registro de onda de calor em uma determinada região europeia foi comparado com sua probabilidade (P_0) de não ter influências antropogênicas sobre o clima. Essa abordagem é mostrada esquematicamente na Figura 5.

Estas probabilidades foram determinadas a partir de simulações de modelos climáticos ajustados por observações. O estudo concluiu que a influência humana era muito provavelmente (probabilidade > 90%) a causa de um evento de onda de calor. Portanto, tendo calculado as probabilidades do evento na presença e na ausência das alterações climáticas antropogênicas, P_1 e P_0 , os resultados podem ser expressos como uma probabilidade, P_1/P_0 , ou seja, no caso uma fração da probabilidade. Alternativamente, eles podem ser expressos como um extremo, calculado como $1-P_0/P_1$ onde um extremo superior a 0,5, como neste caso, indica sua probabilidade de aumento.

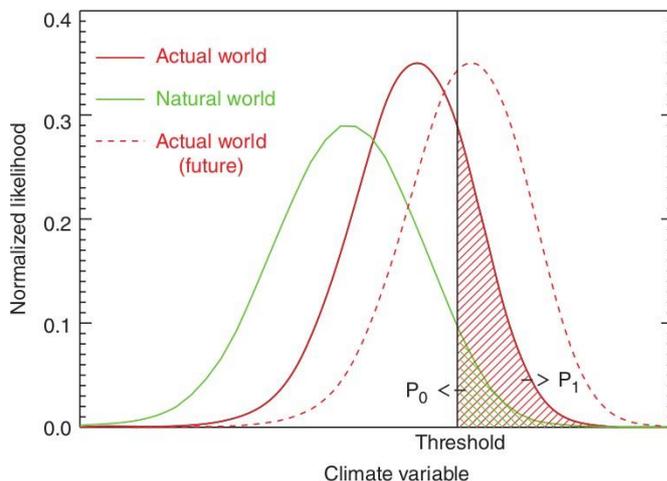


Figura 5. Uma ilustração das funções de densidade de probabilidade (PDFs) de uma variável climática (linha verde) e o efeito da influência humana sobre o clima (linha vermelha). As probabilidades correspondentes de exceder um limiar (P_1 e P_0) são representadas pelas áreas tracejadas da mesma cor. A linha vermelha tracejada ilustra como o PDF do mundo real pode variar com a mudança do clima.

4. RESULTADOS PERÍODO HISTÓRICO

Neste capítulo são apresentados os resultados da comparação entre os dados observados e o modelo Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5. Para a remoção do viés dos modelos, foi utilizada a técnica descrita no capítulo anterior. Foi utilizado também o método de regressão linear para encontrar uma relação entre a velocidade do vento observada e a rajada do vento observado e com essa relação foi feita a extrapolação da rajada do vento no modelo Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5, a partir da velocidade do vento horário dos modelos. Em seguida, são apresentadas as distribuições de frequência de probabilidade de intensidade do vento e rajada estimados pelos modelos, bem como o ajuste dos modelos de distribuição para definir aquele que melhor representa a distribuição de frequência de cada série temporal usando os modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5. Identificado o melhor ajuste de distribuição do vento, calcula-se com base nesse modelo, o período de retorno dos máximos de velocidade do vento e rajada para as projeções futuras com um nível de confiabilidade de 95%. Por último são apresentados os mapas do índice de riscos (FAR).

4.1. Resultado das Avaliação dos Modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5

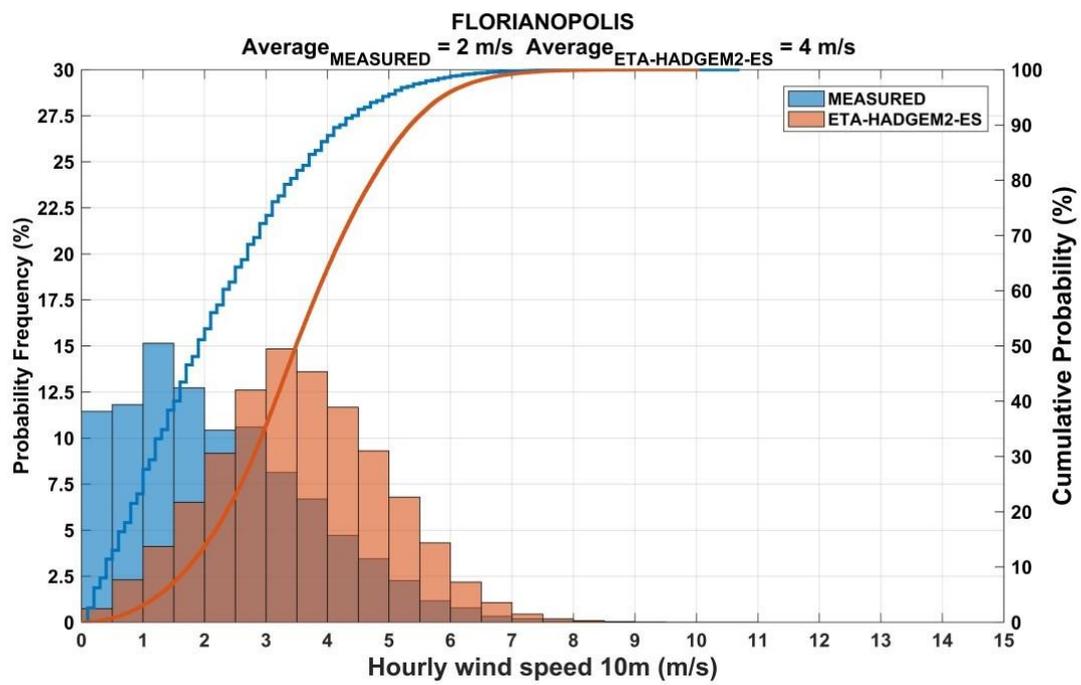
Uma avaliação das simulações do período histórico dos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 é apresentada juntamente com uma descrição das distribuições de função e discussões sobre os erros. Os modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 foram avaliadas contra dados observacionais. Como mencionado nos capítulos anteriores, os modelos numéricos de clima possuem um notório viés na simulação de velocidade do vento, com isso a correção destes erros é necessária para diversas aplicações. Nesta seção uma avaliação da simulação de velocidade do vento pelo modelo Eta é apresentada.

Nas figuras de distribuição de probabilidade de frequência e probabilidade acumulada são apresentadas as comparações entre as duas distribuições, a medida e a simulada, em que o modelo Eta (laranja) é comparado com as observações (azul). Nos gráficos são mostrados os máximos horários para algumas estações enquanto as demais estações estão em anexo ao produto.

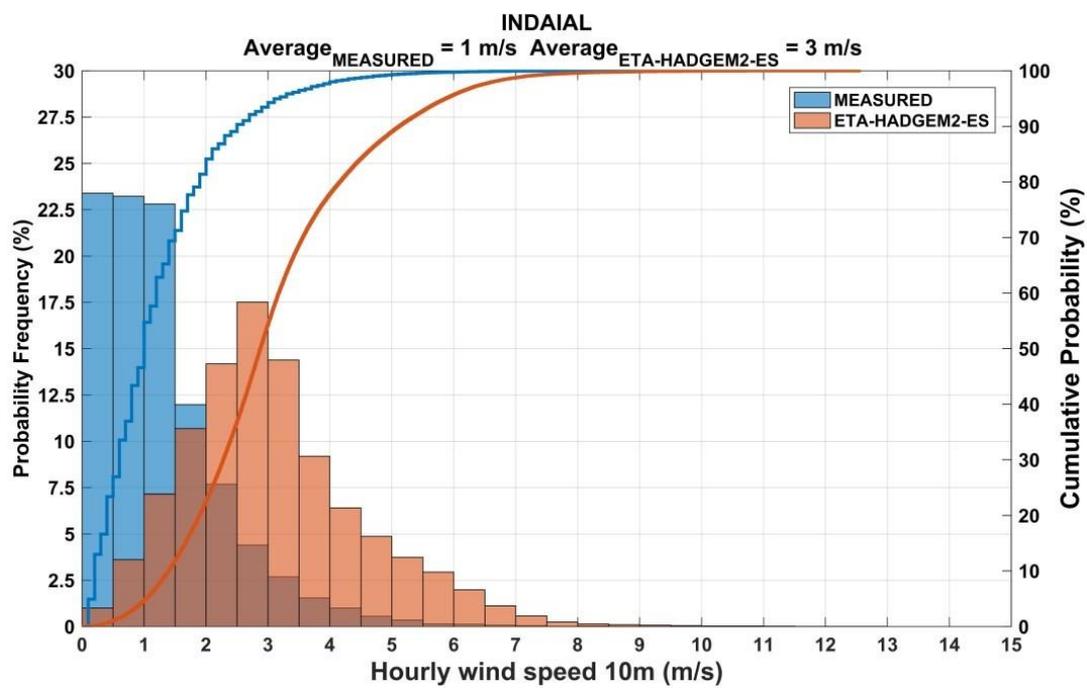
Nos gráficos de distribuição de probabilidade de frequência e probabilidade acumulada do produto 3, descrito em (LIMA, 2019) são diferentes dos gráficos apresentado neste relatório, em virtude de a correção estatística do viés do modelo ter sido realizada na resolução horaria do modelo, enquanto no produto 3 a correção foi realizada na resolução temporal diária.

Verificando as Figuras 6 e 7, observa-se que o modelo Eta (HadGEM-ES e MIROC) tende a superestimar os dados medidos para as estações das figuras abaixo. Observa-se ainda que, apesar de o modelo apresentar um viés elevado, ocorre uma concordância entre os dados medidos e modelados nas estações de Florianópolis e Dionísio Cerqueira, porém um alto viés em Indaial e Caçador.

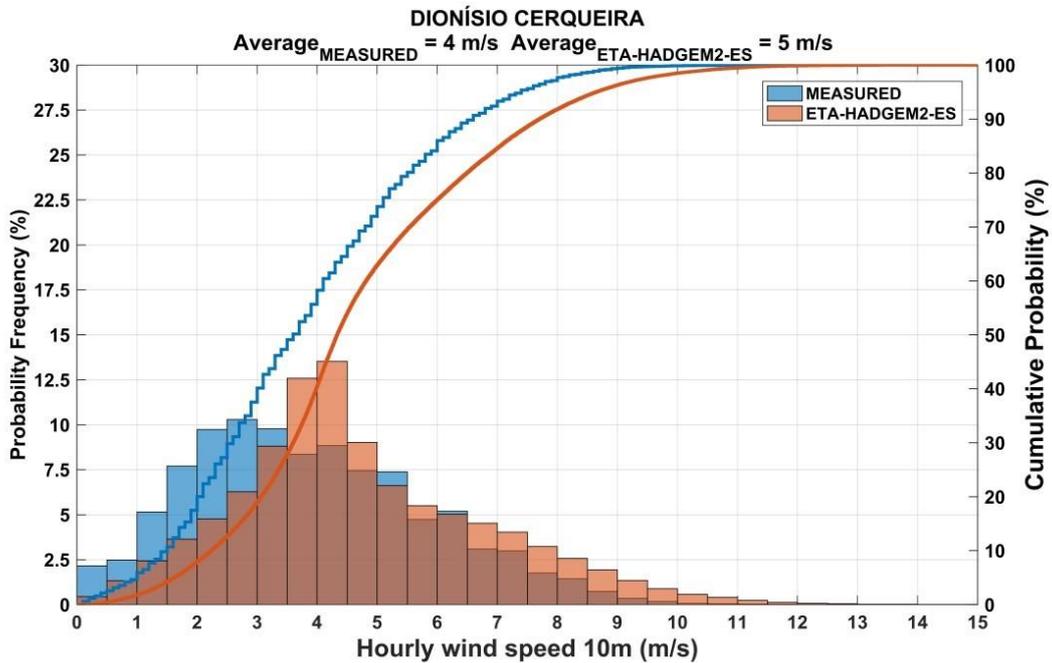
a)



b)



c)



d)

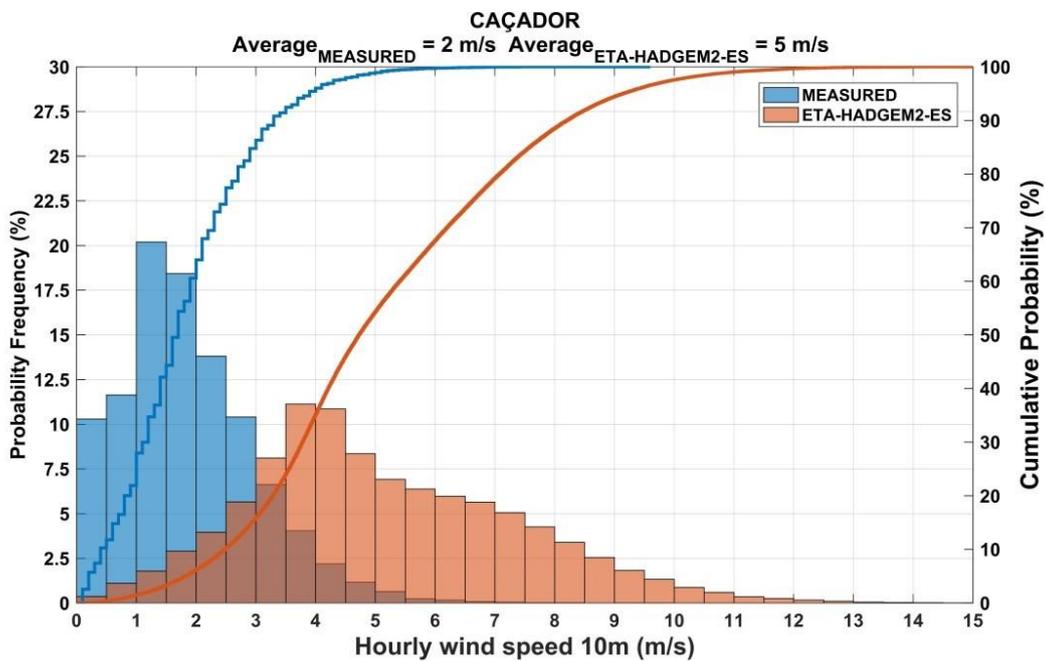
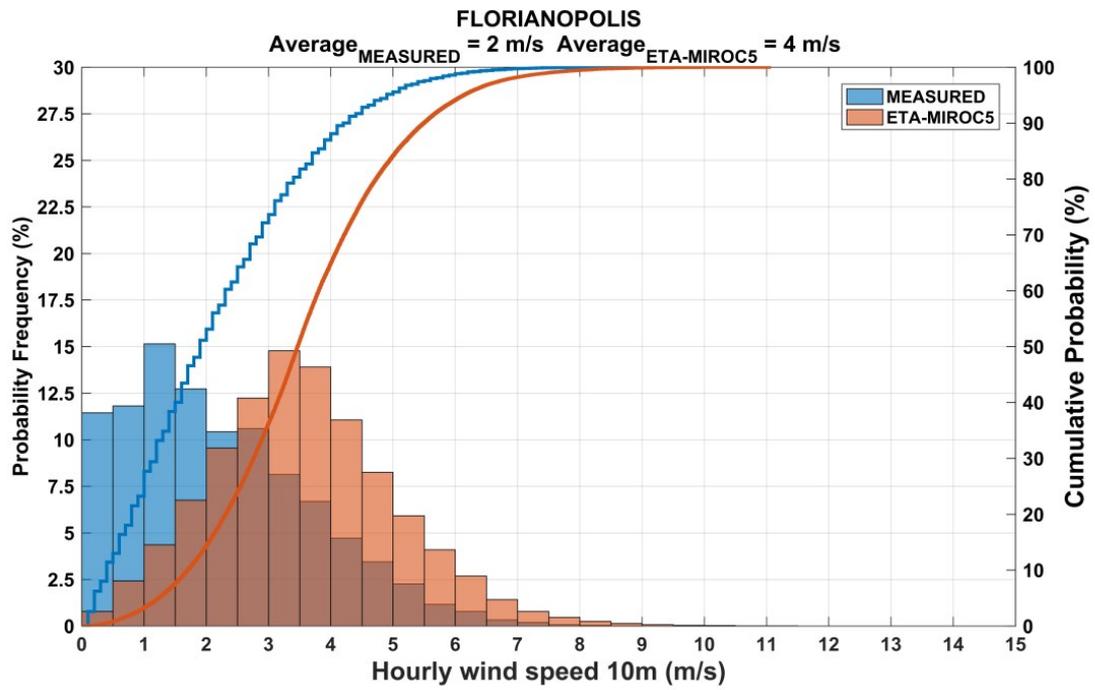
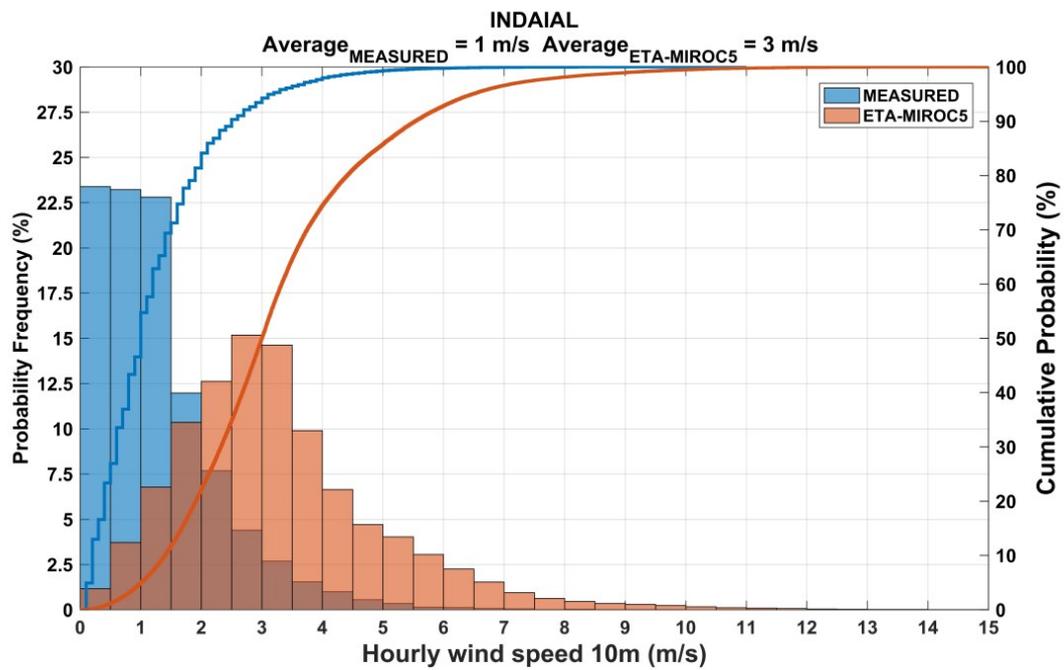


Figura 6. Distribuições de probabilidade de frequência e probabilidade acumulada dos dados medidos e do modelo Eta-HADGEM2-ES, período histórico, para a velocidade do vento a 10m de altura.

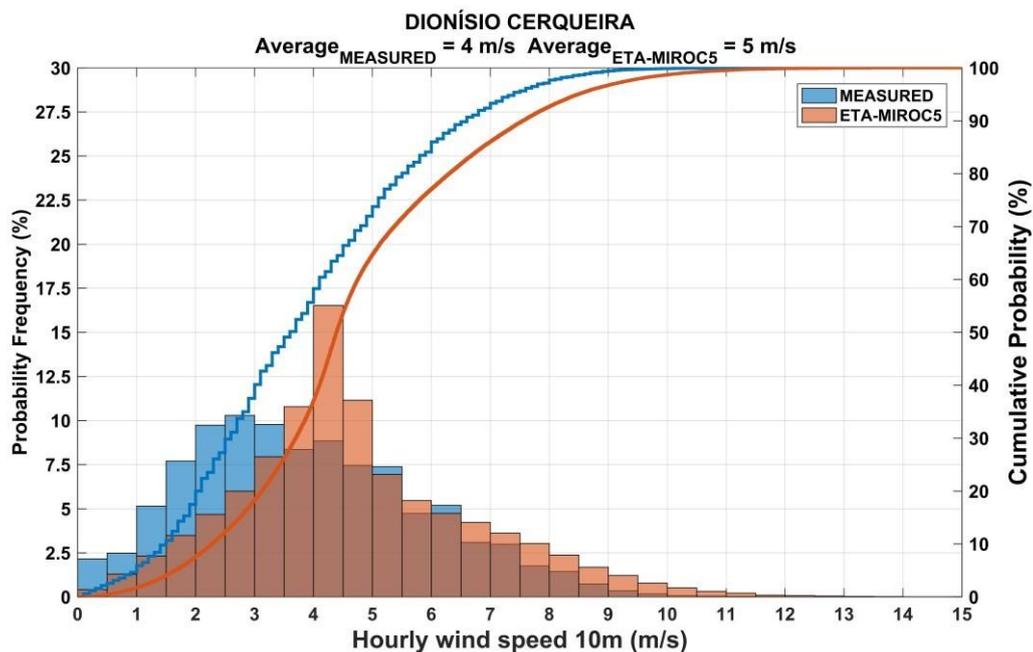
a)



b)



c)



d)

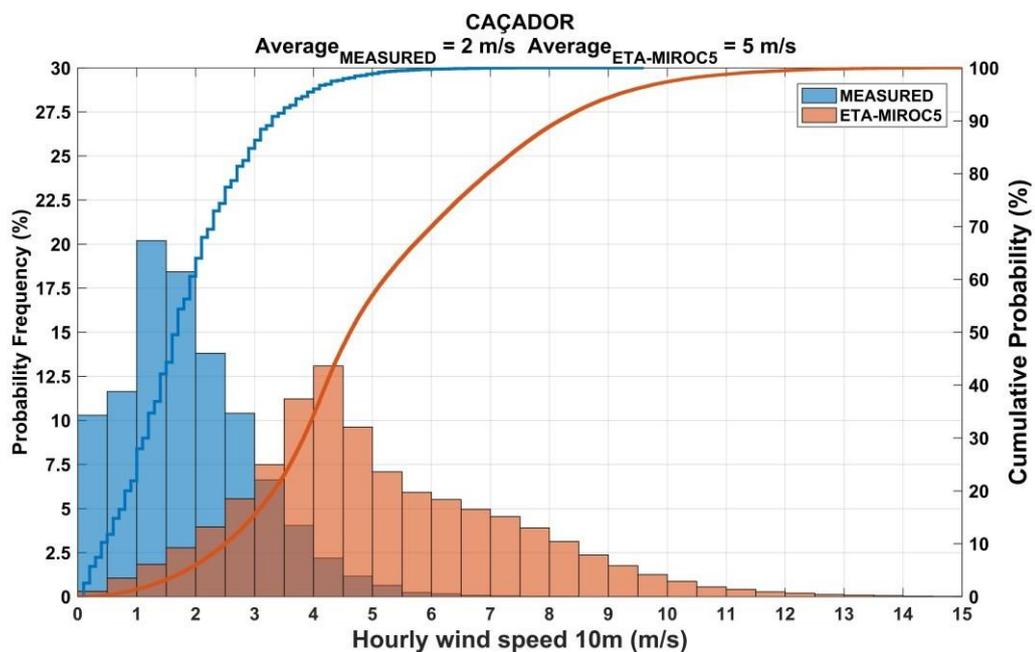
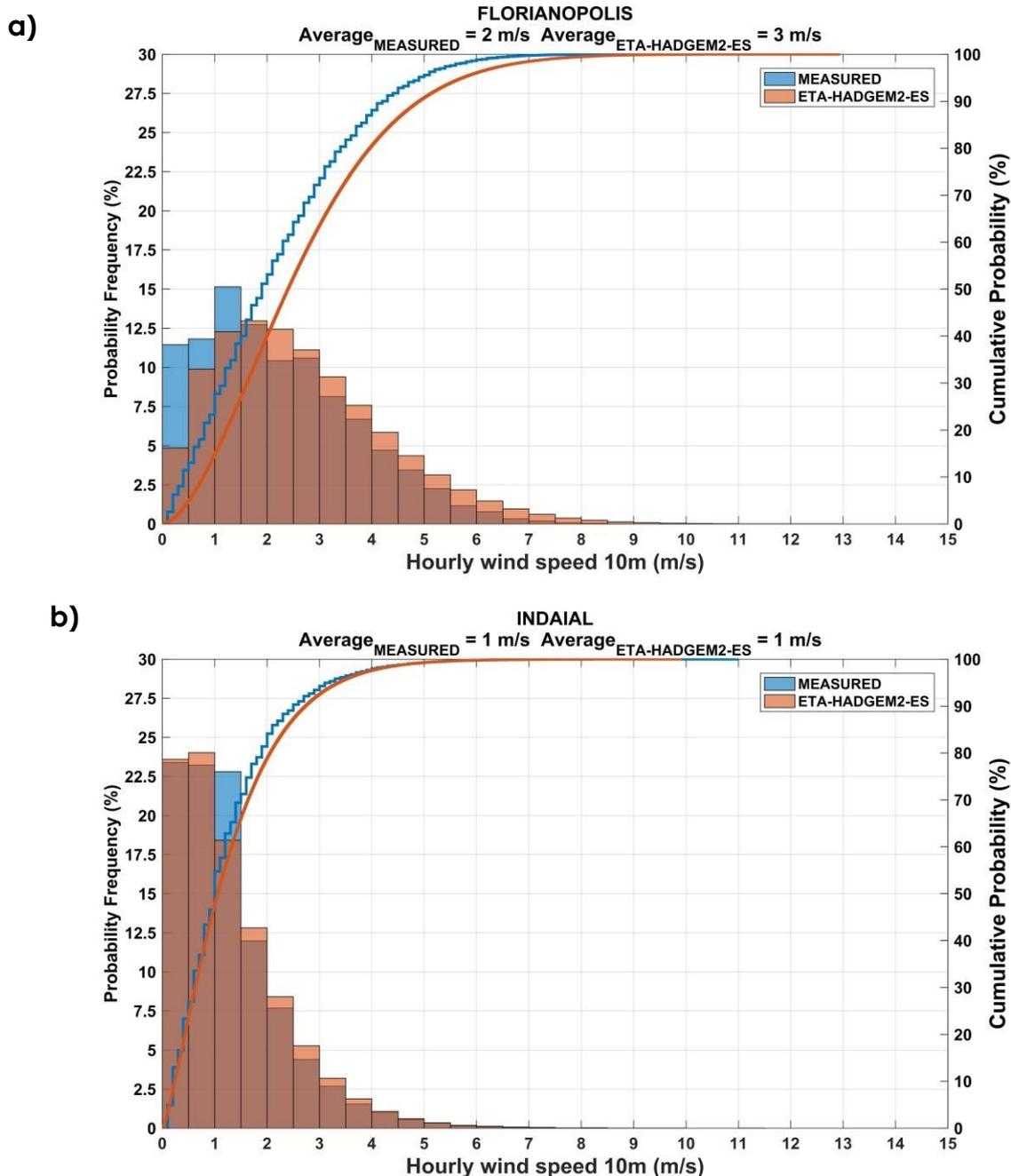


Figura 7. Distribuições de probabilidade de ocorrência e probabilidade acumulada dos dados medidos e do modelo Eta-MIROC5, período histórico, para a velocidade do vento a 10m de altura.

4.2. Resultados da correção do viés do modelo Eta

Verificou-se nas Figura 8 e 9, que os modelos Eta-HADGEM2-ES e Eta-MIROC5, após corrigidos pelos parâmetros da distribuição de Weibull apresentam distribuição de frequência similar aos dados medidos para a maior parte das estações de SC. As demais estações estão no arquivo anexo ao produto. Observa-se ainda que os modelos corrigidos apresentam médias semelhantes aos dados medidos. Nota-se uma melhoria na concordância entre os dados medidos e modelados em todas as estações.



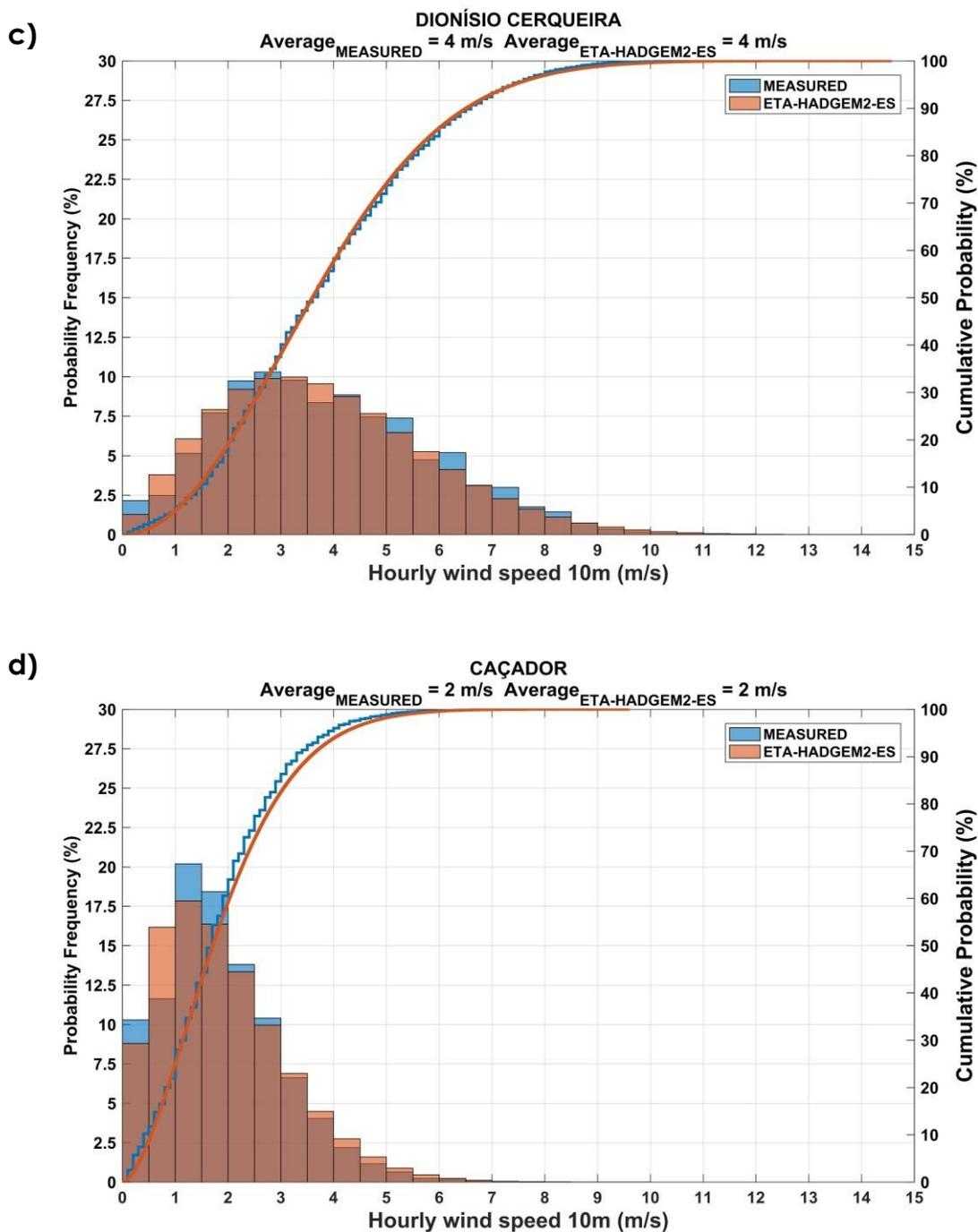
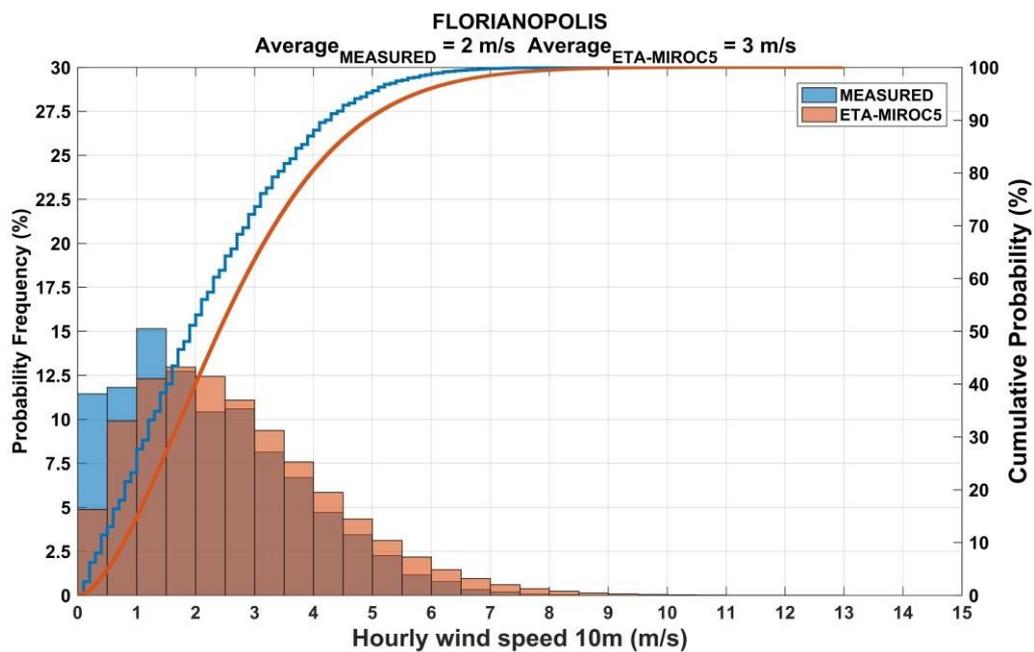
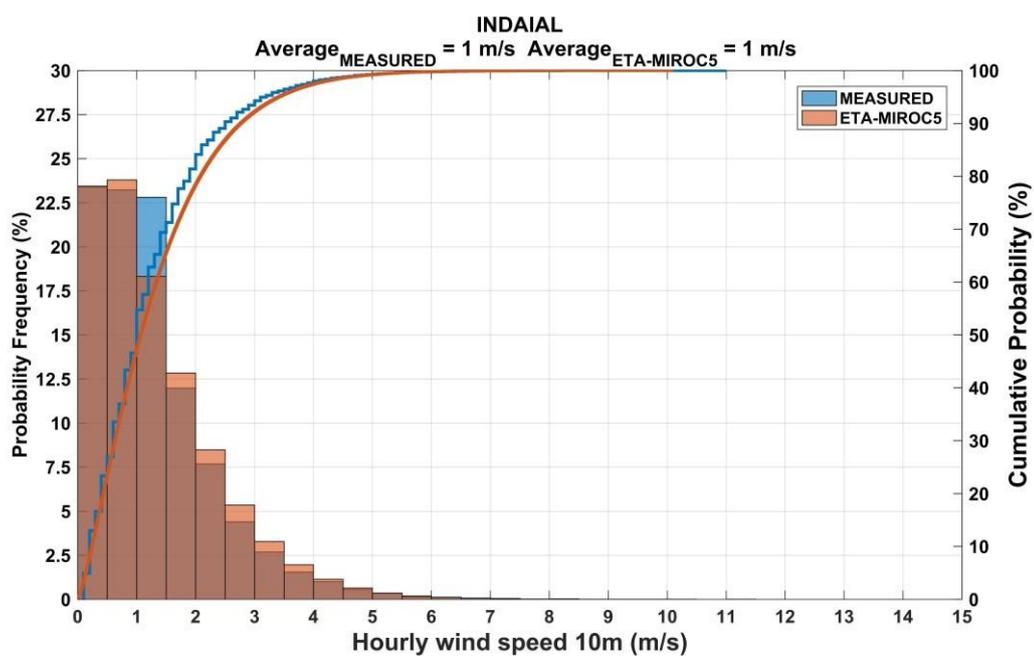


Figura 8. Distribuições de probabilidade de frequência e probabilidade acumulada dos dados medidos e do modelo Eta-HADGEM-ES corrigido pela porcentagem da diferença dos parâmetros da distribuição de Weibull, período histórico, para a velocidade do vento a 10m de altura.

a)



b)



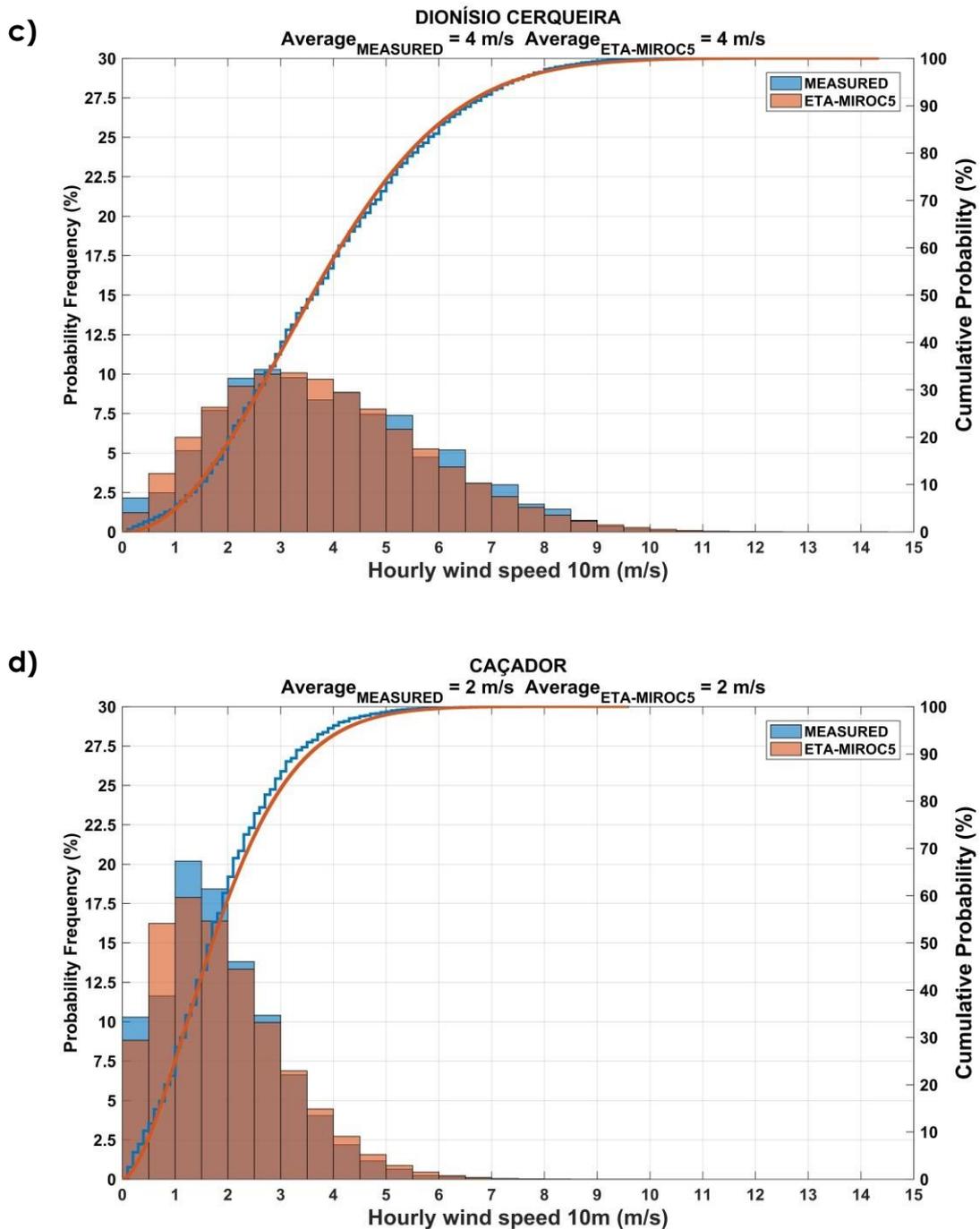


Figura 9. Distribuições de probabilidade de frequência e probabilidade acumulada dos dados medidos e do modelo Eta-MIROC5 corrigido pela porcentagem da diferença dos parâmetros da distribuição de Weibull, período histórico, para a velocidade do vento a 10m de altura.

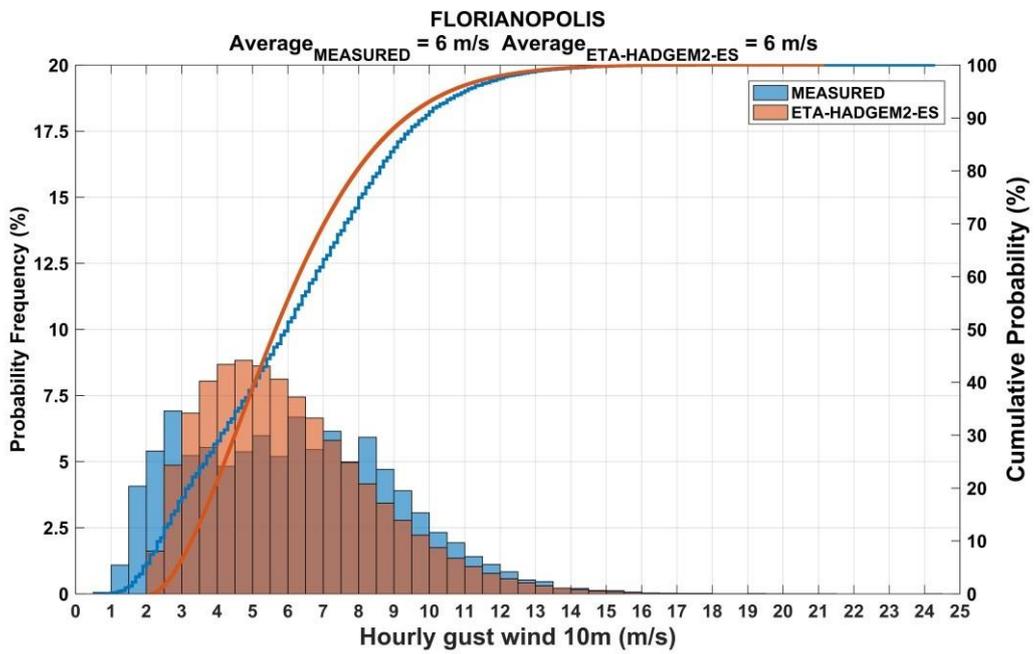
4.3. Resultado da Relação entre a velocidade do vento média observado e a rajada do vento médio observados

Nas Figuras 10 e 11 são mostrados os resultados obtidos pela comparação entre as simulações de rajada e medidas de rajada de vento a 10 metros de altura. A rajada de vento foi estimada no modelo Eta através de uma regressão linear, calculada em relação a todas estações, comparando a velocidade do vento horário com a máxima rajada no intervalo de uma hora dos dados medidos. Uma avaliação das simulações do período histórico do modelo Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 são apresentadas juntamente com uma descrição das funções de distribuições de probabilidades e discussões sobre os erros. O modelo Eta foi avaliado em relação aos dados observacionais de rajada de vento.

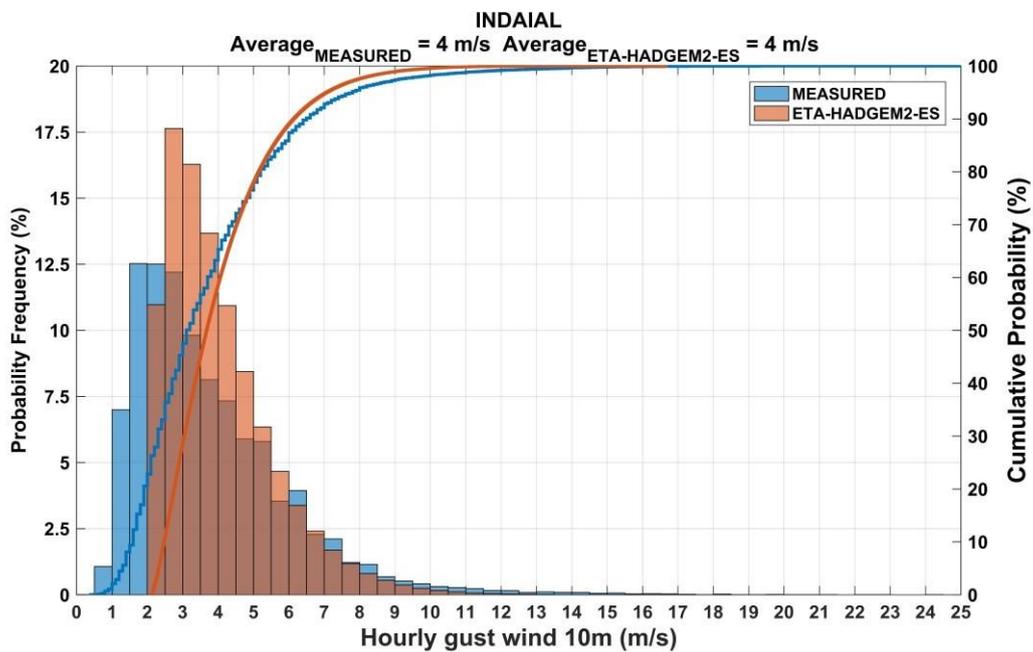
Os modelos numéricos não possuem a capacidade de simular a rajada do vento, com isso, a obtenção de simulações de rajada do vento por método estatístico é necessária para diversas aplicações. Nos gráficos abaixo são mostradas as distribuições horárias para algumas estações. A mesma análise foi feita para o modelo Eta-MIROC5, ao qual obteve-se um desempenho semelhante. Os demais gráficos estão em anexo ao produto.

Verifica-se nas Figuras 10 e 11, que o modelo Eta tende a simular bem os extremos observados nos dados medidos para a rajada do vento horário nas estações de Florianópolis, Indaial, Dionísio Cerqueira e Caçador para o período histórico. Conclui-se que a correção foi satisfatória, dando suporte ao desenvolvimento de uma metodologia para estimar rajada de vento máximo diária no modelo Eta nas projeções futuras, possibilita ainda um estudo aprofundado e o desenvolvimento de novas metodologias estatística para simular a rajada do vento em modelos atmosféricos.

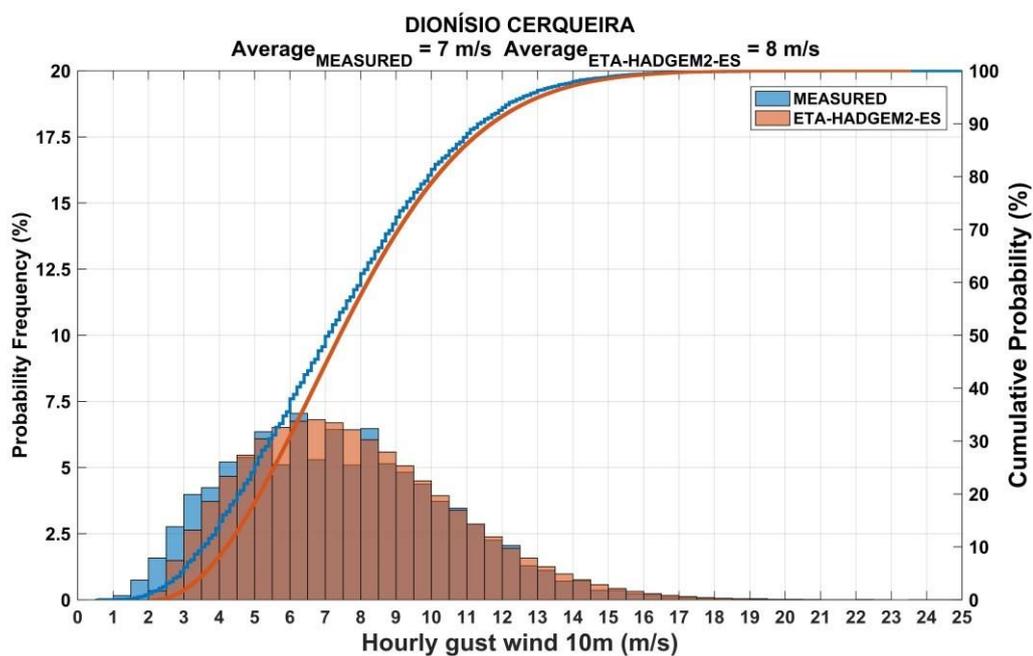
a)



b)



c)



d)

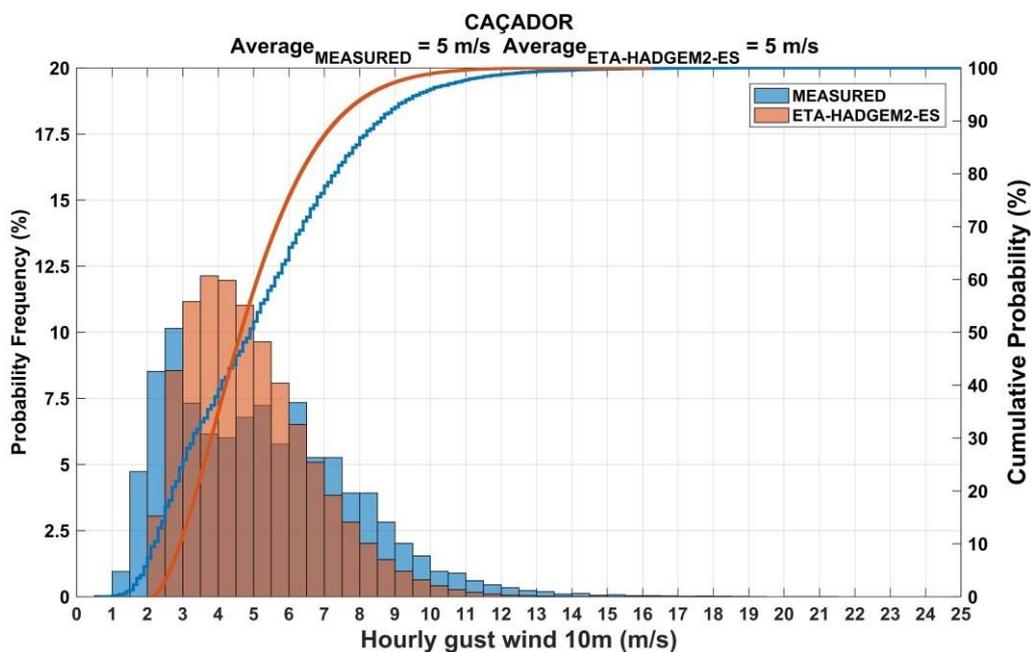
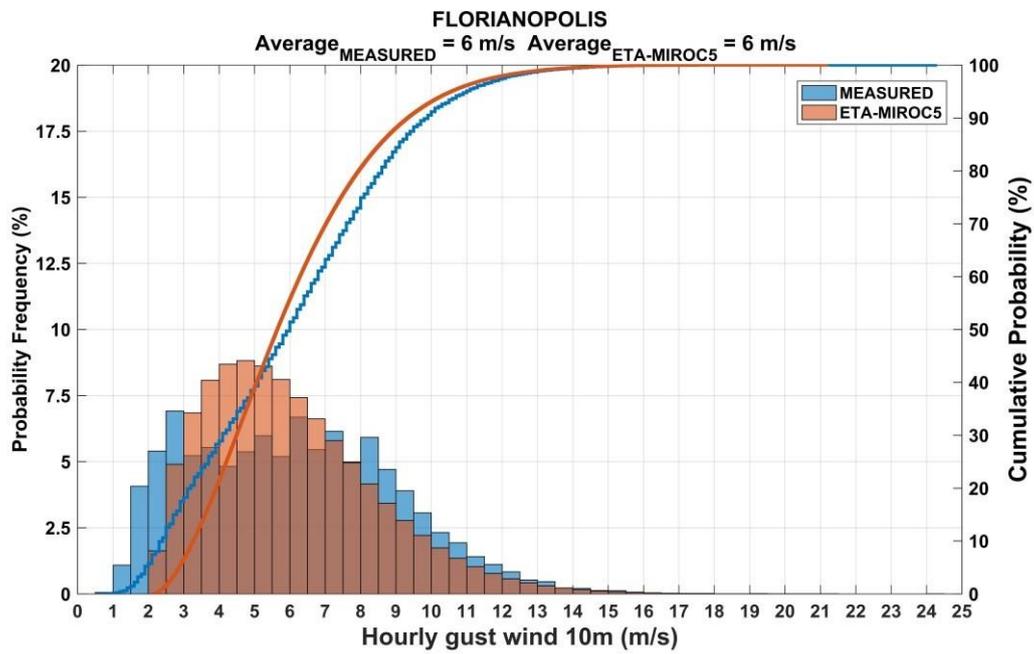
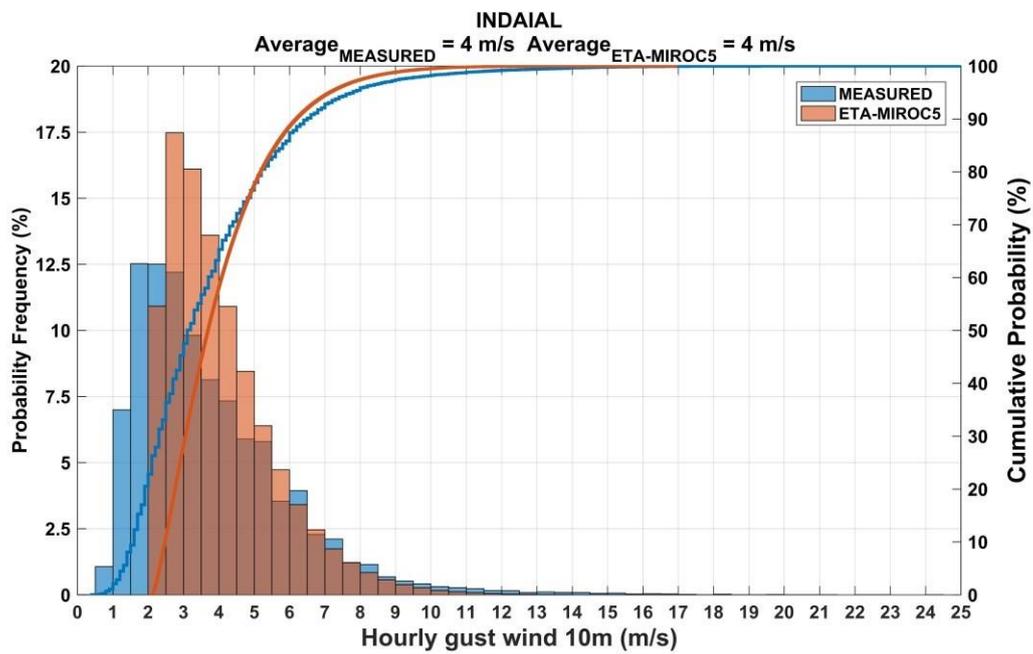


Figura 10. Distribuições de probabilidade de frequência e probabilidade acumulada dos dados medidos de rajada de vento (em azul) e do modelo Eta-Hadgem2-ES (em laranja) estimados a partir da regressão linear mostrada na Figura 4, período histórico, para o vento a 10m de altura.

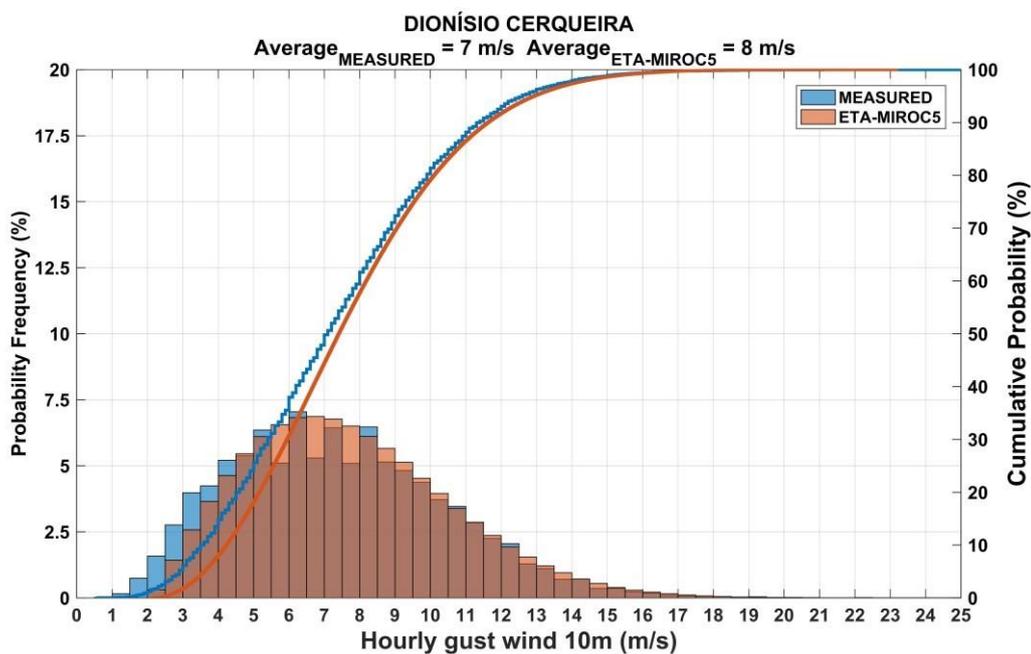
a)



b)



c)



d)

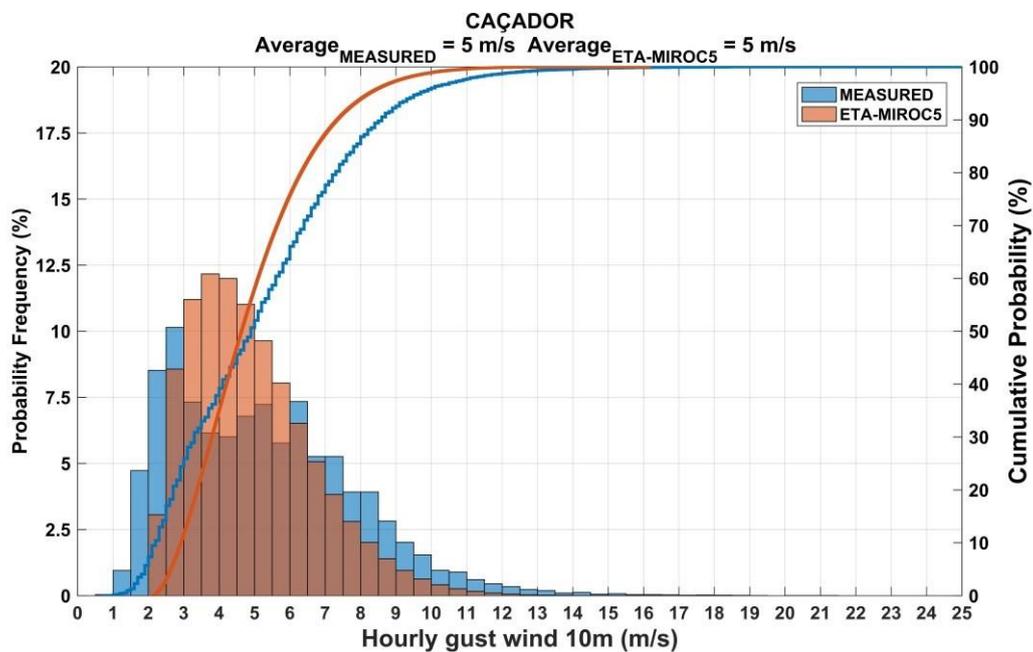
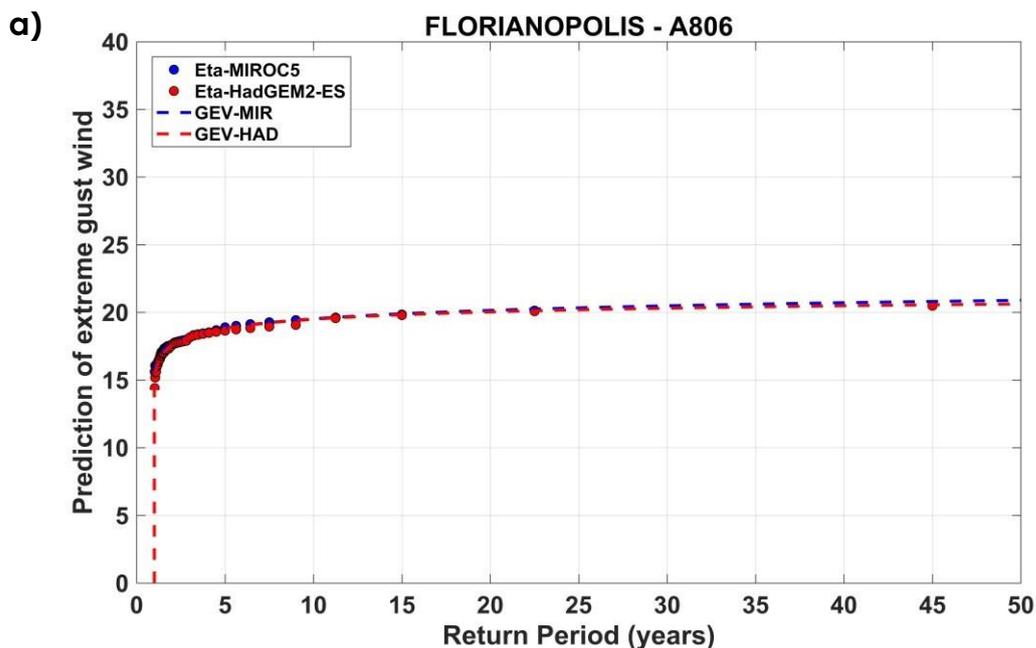


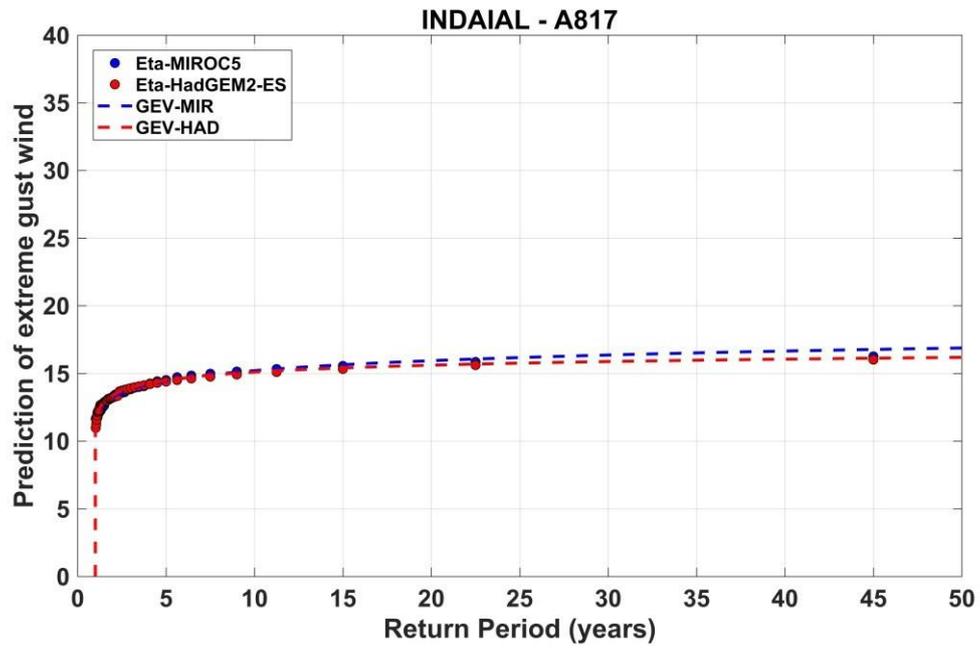
Figura 11. Distribuições de probabilidade de frequência e probabilidade acumulada dos dados medidos de rajada de vento (em azul) e do modelo Eta-MIROC5 (em laranja) estimados a partir da regressão linear mostrada na Figura 4, período histórico, para o vento a 10m de altura.

4.4. Resultados do Período de Retorno – T da Rajada de Vento para o Modelo Eta (Período Histórico)

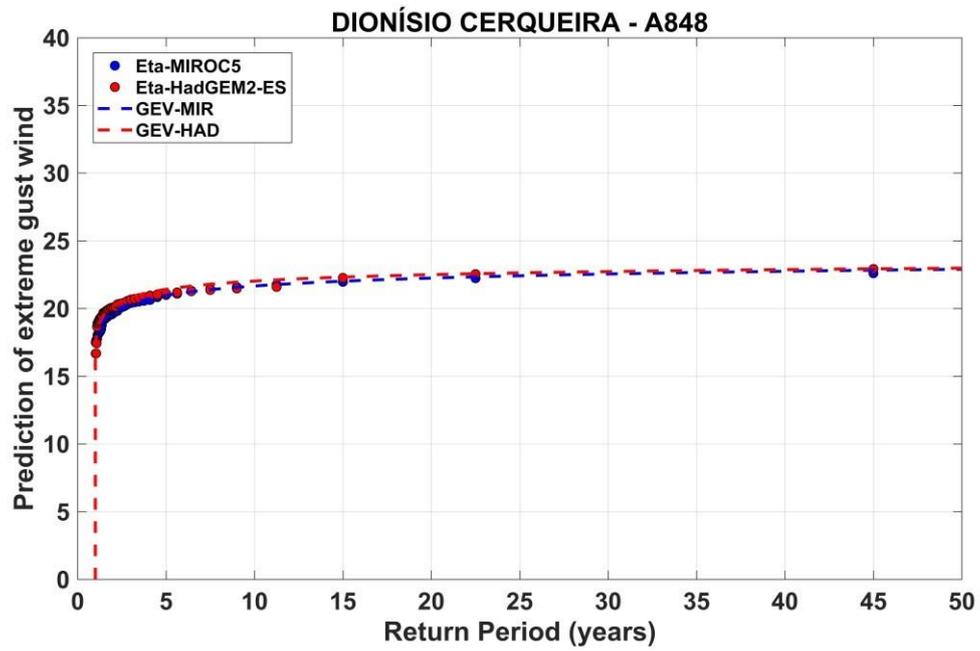
A Figura 12 e a Tabela 2 indicam a rajada máxima anual do vento do modelo Eta esperada para o período de retorno de 5, 10, 20, 25, 40 e 50 anos. Para estas estimativas foi utilizado os modelos de distribuições para os máximos anuais, ou seja, as três distribuições usada neste relatório, GEV, Weibull e Gumbel. O desempenho dos três ajustes é semelhante, e diante disto, pode-se utilizar qualquer uma das três para calcular o período de retorno de uma série de dados ou em um determinado ponto específico. Optou-se por mostrar apenas a distribuição GEV, as demais encontram-se em anexo. Uma diferença em relação a análise com os dados observados do produto 02 (LIMA, 2019) é que a quantidade de dados simuladas pelo modelo Eta é superior a quantidade de dados observados, o que melhora os ajustes das distribuições para o cálculo do período de retorno.



b)



c)



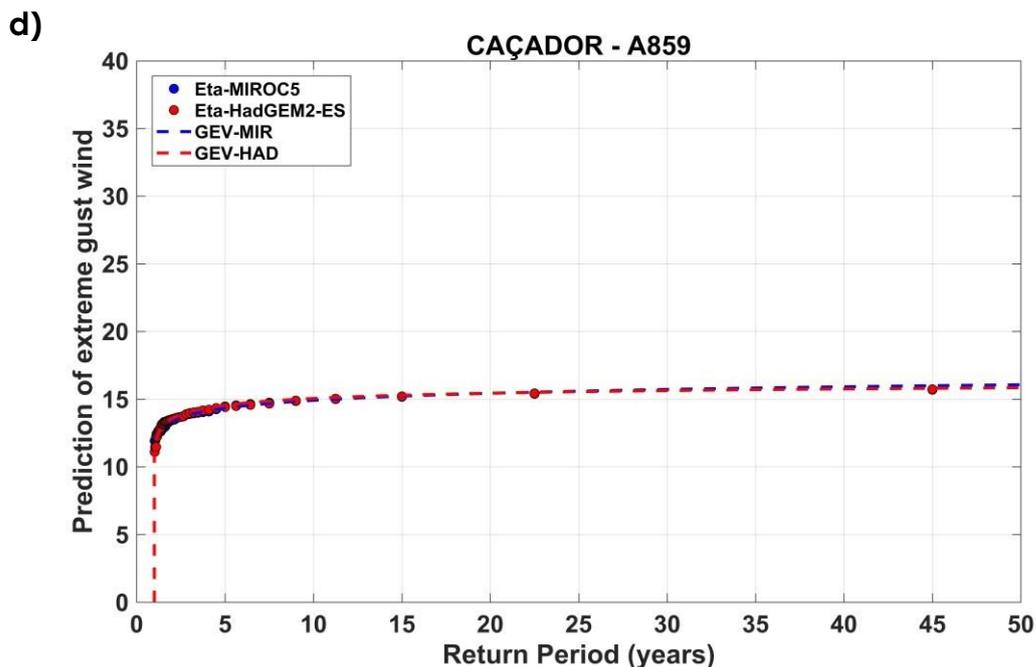


Figura 12. Período de retorno da rajada máxima anual do vento para as simulações do período histórico do modelo Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5.

O período de retorno descrito acima, é mostrado na Tabela 2. Procurou-se pelas maiores rajadas ocorridas nas estações. As estações que apresentaram valores superiores a 20 m/s para o período de retorno de 5, 15, 20, 25, 40 e 50 anos, estão em negrito. Todas as estações que mostraram rajada de vento superiores a 20 m/s, apresentaram este comportamento para as três distribuições analisadas GEV, Weibull e Gumbel. A faixa de classificação dos períodos de retorno de 50 anos varia de ventania severa até tempestade, segundo a escala de Beaufort, Tabela 1. O modelo do Eta-MIROC5 apresentou resultados semelhante ao Eta-HadGEM2-ES.

Tabela 2. Velocidade máxima anual da rajada esperada para diversos períodos de retorno conforme simulado pelo modelo Eta-HadGEM2-ES.

Stations	GEV						Weibull						Gumbel					
	Return Period (Years)						Return Period (Years)						Return Period (Years)					
	5	15	20	25	40	50	5	15	20	25	40	50	5	15	20	25	40	50
A806	19	19	20	20	20	21	19	20	20	20	20	20	19	20	20	20	20	20
A814	14	14	15	15	15	15	14	14	15	15	15	15	14	14	15	15	15	15
A815	18	18	18	19	19	19	18	18	18	19	19	19	18	18	18	19	19	19
A816	20	21	21	21	21	22	20	21	21	21	21	21	20	21	21	21	21	21
A817	14	15	15	16	16	16	15	15	15	16	16	16	15	15	15	16	16	16
A841	19	20	20	20	21	21	19	20	20	20	20	21	19	20	20	20	20	20
A848	21	22	22	23	23	23	21	22	22	22	23	23	21	22	22	22	23	23
A851	15	16	16	16	17	17	15	16	16	16	16	16	15	16	16	16	16	16
A857	16	17	17	17	17	18	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
A858	23	24	24	24	25	25	23	24	24	24	24	24	23	24	24	24	24	24
A859	15	15	15	16	16	16	15	15	15	15	16	16	15	15	15	15	16	16
A860	17	18	18	18	18	18	17	18	18	18	18	18	17	18	18	18	18	18
A861	15	16	16	17	17	17	15	16	16	16	17	17	15	16	16	16	17	17
A862	16	17	17	17	18	18	16	17	17	17	17	18	16	17	17	17	17	17
A863	17	17	18	18	19	19	17	17	18	18	18	18	17	17	18	18	18	18
A864	18	18	19	19	20	20	18	19	19	19	19	19	18	19	19	19	19	19
A867	23	24	24	25	25	25	23	24	24	25	25	25	23	24	24	25	25	25
A868	15	16	16	17	17	17	15	16	16	16	17	17	16	16	16	16	17	17
SBCH	21	22	22	22	23	23	22	22	22	22	23	23	22	22	22	22	23	23
SBCT	20	20	21	21	21	22	20	20	21	21	21	21	20	20	21	21	21	21
SBFI	18	19	19	19	20	20	18	19	19	19	20	20	18	19	19	19	20	20
SBFL	19	19	20	20	20	21	19	20	20	20	20	20	19	20	20	20	20	20
SBJV	16	17	17	17	17	17	16	17	17	17	17	17	16	17	17	17	17	17
SBLO	16	17	17	17	18	18	17	17	17	17	17	18	17	17	17	17	17	17
SBNF	18	18	18	19	19	19	18	18	18	19	19	19	18	18	18	19	19	19
SBPA	23	23	24	24	25	25	23	24	24	24	24	24	23	24	24	24	24	24
SBSM	22	22	23	23	24	24	22	23	23	23	23	23	22	23	23	23	23	23

4.5. Análise Espacial do Período de Retorno de 50 anos com as Distribuições GEV, Weibull e Gumbel para a Rajada do Vento Simulado pelo Modelo ETA

Nas Figuras 13 e 14 tem-se os mapas do período de retorno de 50 anos para os dois modelos estudados. Optou-se por mostrar apenas a distribuição *Generalized Extreme Value* (GEV) já que a Gumbel (GUM) e Weibull (WBL) apresentaram resultados semelhantes. Não se observa grandes diferenças entre os dois modelos, o que indica que qualquer modelo pode ser usada para o cálculo do período de retorno. Para

efeito de comparação, a Figura 14 mostra o período de retorno de 50 anos, dada pela NBR 5422 (ABNT, 1985). Observa-se que a norma apresenta valores próximos de período de retorno, porém a norma tende a superestimar os dados do modelo, devido a divergência é necessária uma atualização dos valores para norma NBR 5422.

Uma outra observação é que a norma NBR 5422 foi realizada utilizando a distribuição Gumbel, apesar de ser uma distribuição bastante utilizada no passado, hoje encontra-se na literatura distribuições como a GEV e WBL mais apropriadas para eventos extremos (SANSIGOLO, 2008a). Para a atualização da norma NBR 5422 (ABNT, 1985) são necessários uma maior densidade de estações meteorológica para a medição de rajada de ventos e análise da eficiência de outras distribuições para o cálculo do período de retorno. Neste trabalho as três distribuições apresentaram resultados semelhantes, e apresentaremos os resultados da GEV, por ser a mais apropriada para eventos extremos. Para as demais distribuições, os dados e gráficos encontram-se no anexo do produto.

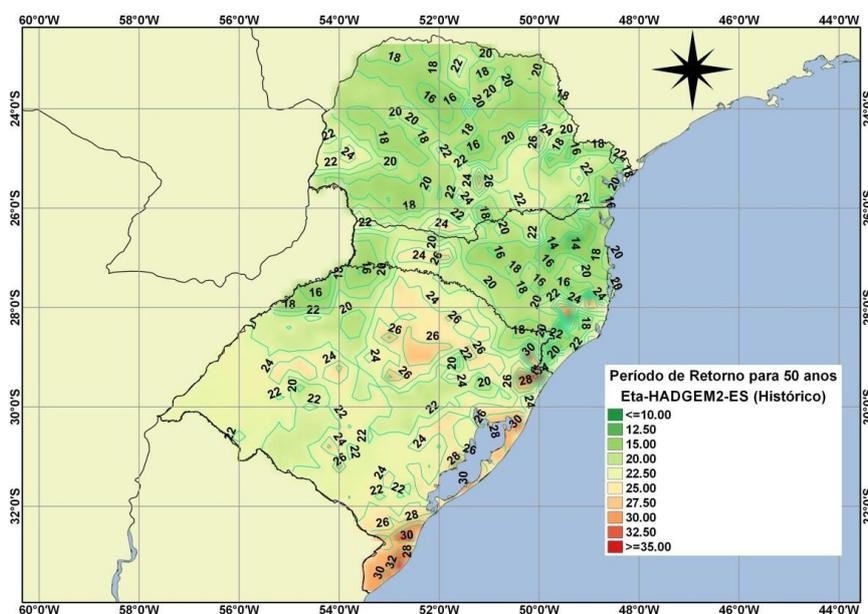


Figura 13. Rajada máxima anual do vento esperada para período de retorno de 50 anos para as simulações do período histórico do modelo Eta-HadGEM2-ES.

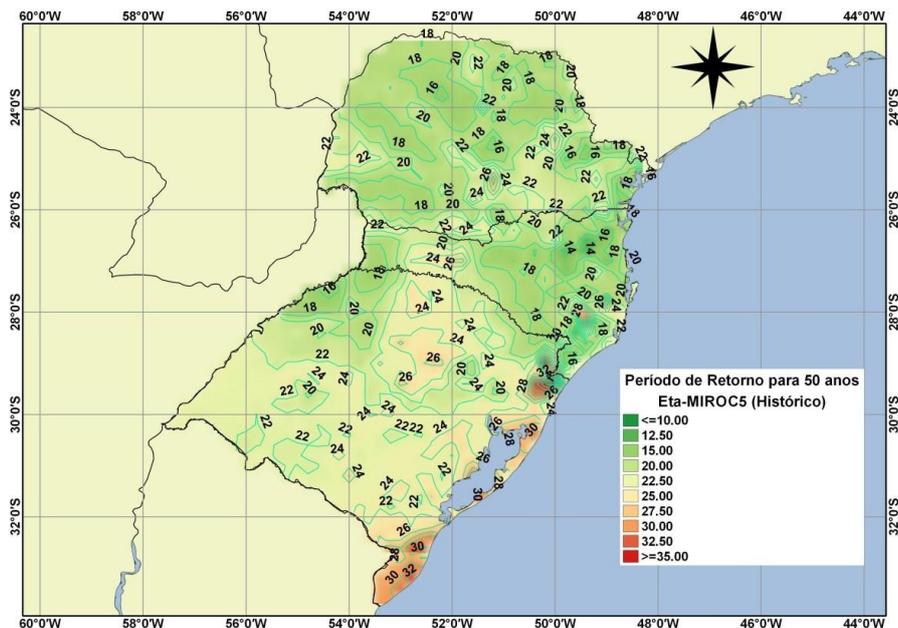


Figura 14. Rajada máxima anual do vento esperada para período de retorno de 50 anos para as simulações do período histórico do modelo Eta-MIROC5.

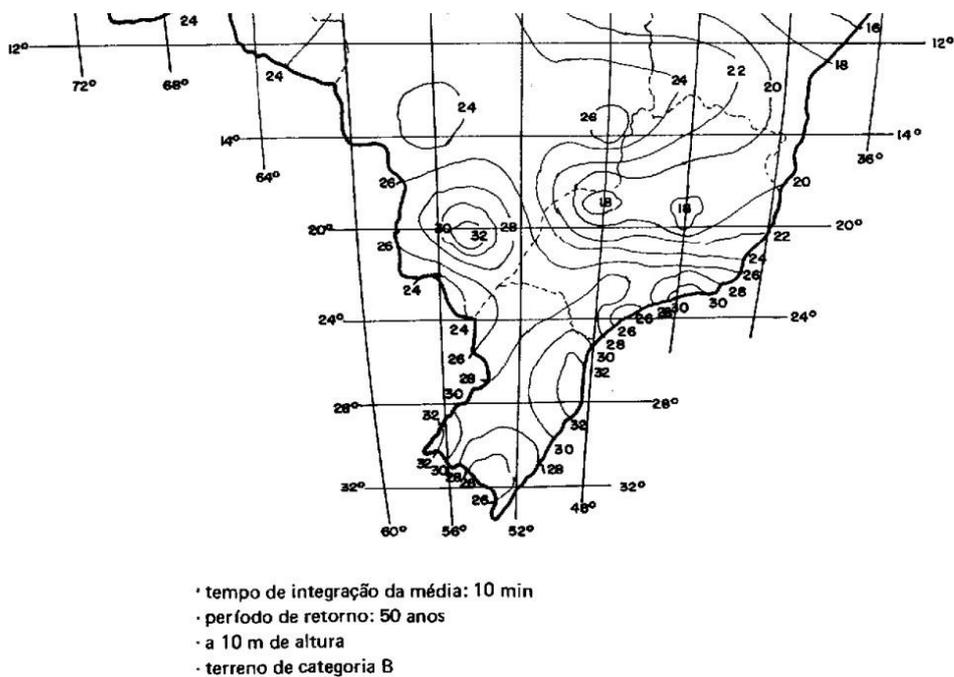


Figura 15. Rajada máxima anual do vento esperada para período de retorno de 50 anos segundo a NBR 5422.

Nas Figuras 16 e 17 têm-se os mapas da rajada máxima (a) e do P99 (b) do vento, para o Eta-HADGEM2-ES e Eta-MIROC5, respectivamente. Observa-se um padrão semelhante entre os dois modelos verificada em todo o período de dados, e as localizações das duas linhas de transmissões. Observa-se que os maiores valores de vento ocorrem no oeste do Estado, onde está localizado a linha de transmissão do Ita-Salto Santiago (~26 m/s, Figura 16a) e os menores valores são encontrados no leste do Estado, onde se localiza a linha de Biguaçu-Blumenau (~16 m/s, Figura 16b). Porém, observa-se rajadas elevadas de vento em uma pequena porção sudeste do Estado, próximo a região dos cânions.

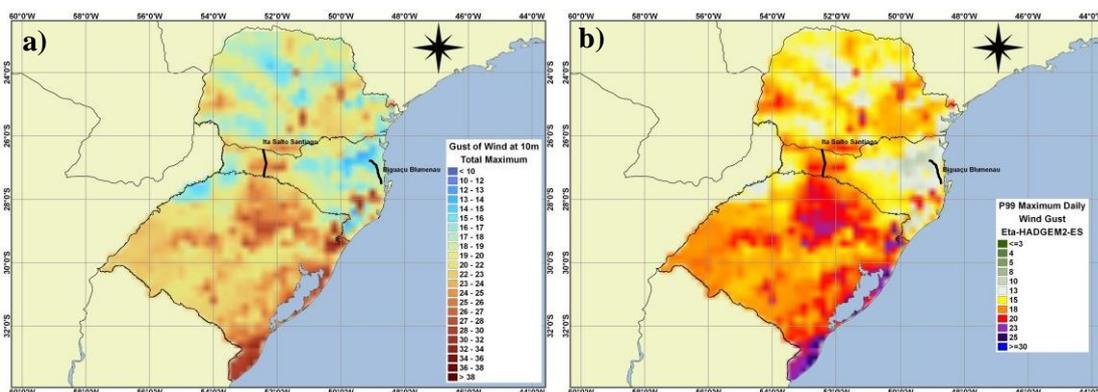


Figura 16. Rajada máxima do vento simulado pelo modelo Eta-HadGEM2-ES.

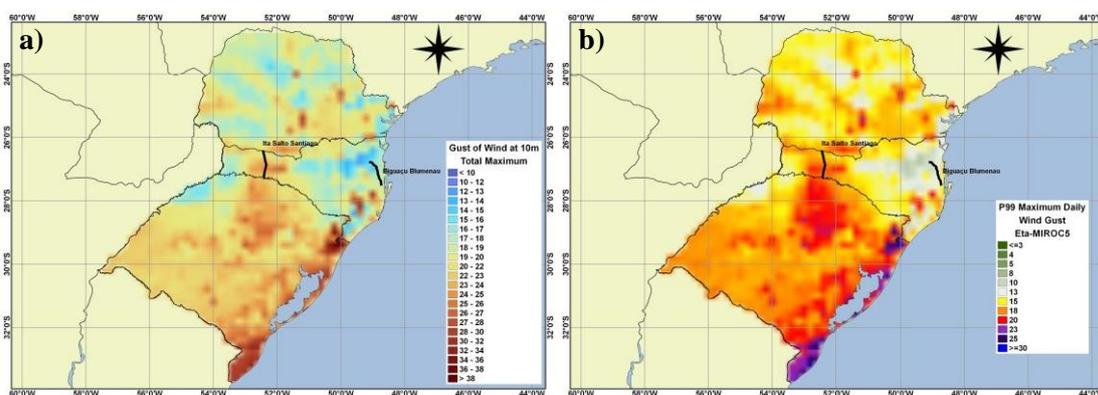


Figura 17. Rajada máxima do vento simulado pelo modelo Eta-MIROC5.

5. RESULTADOS DAS PROJEÇÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nas projeções climáticas futuras, derivadas dos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5. Para a remoção do viés dos modelos, uma técnica de interpolação do erro médio percentual em escala horária foi utilizada, conforme já discutido no capítulo anterior. Esta mesma técnica foi utilizada para as projeções futuras. A mesma técnica estatística de regressão linear utilizada no período histórico para encontrar uma relação entre a velocidade do vento observada e a rajada do vento observado foi aplicada sobre as projeções futuras. Com essa relação foi feito a extrapolação da rajada do vento no modelo Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5, a partir da velocidade do vento máximo horários dos modelos. Assume-se assim que o erro do modelo se mantém estável entre as rodadas históricas e futuras. Com relação ao ajuste às distribuições de valores extremos, não houve grandes diferenças entre as três distribuições estatísticas testadas no período histórico, sendo assim neste relatório será apresentada apenas a distribuição GEV. As demais distribuições estão nos arquivos NETCDF em anexo ao produto.

5.1. Resultado das Avaliação dos Modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 (Projeções)

Uma avaliação das simulações do período histórico ou *baseline* e das projeções dos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 são apresentadas. As Figuras 18 e 19 mostram a distribuição de frequência e probabilidade acumulada para o período histórico (azul) e projeções futuras (laranja). Nos gráficos são mostrados os máximos horários para algumas estações, as demais estações estão em anexo ao produto.

Verificou-se nos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5, uma tendência de aumento da rajada máxima diária em ambos os cenários. Observou-se ainda que, apesar dos modelos apresentarem um

aumento, ele é mais acentuado no Eta-HadGEM2-ES, com um aumento mais significativo no cenário RCP8.5 que no cenário RCP4.5. Uma importante observação é que as projeções mostram um aumento da rajada do vento para intensidades médias entre 12 m/s e 18 m/s, como observado por exemplo na estação de Dionísio Cerqueira, Figuras 18 e 19, porém não foram observados aumentos significativos nos máximos de rajada de vento. Este comportamento já era esperado devido a limitação dos modelos numéricos em simular os máximos de ventos de rajada.

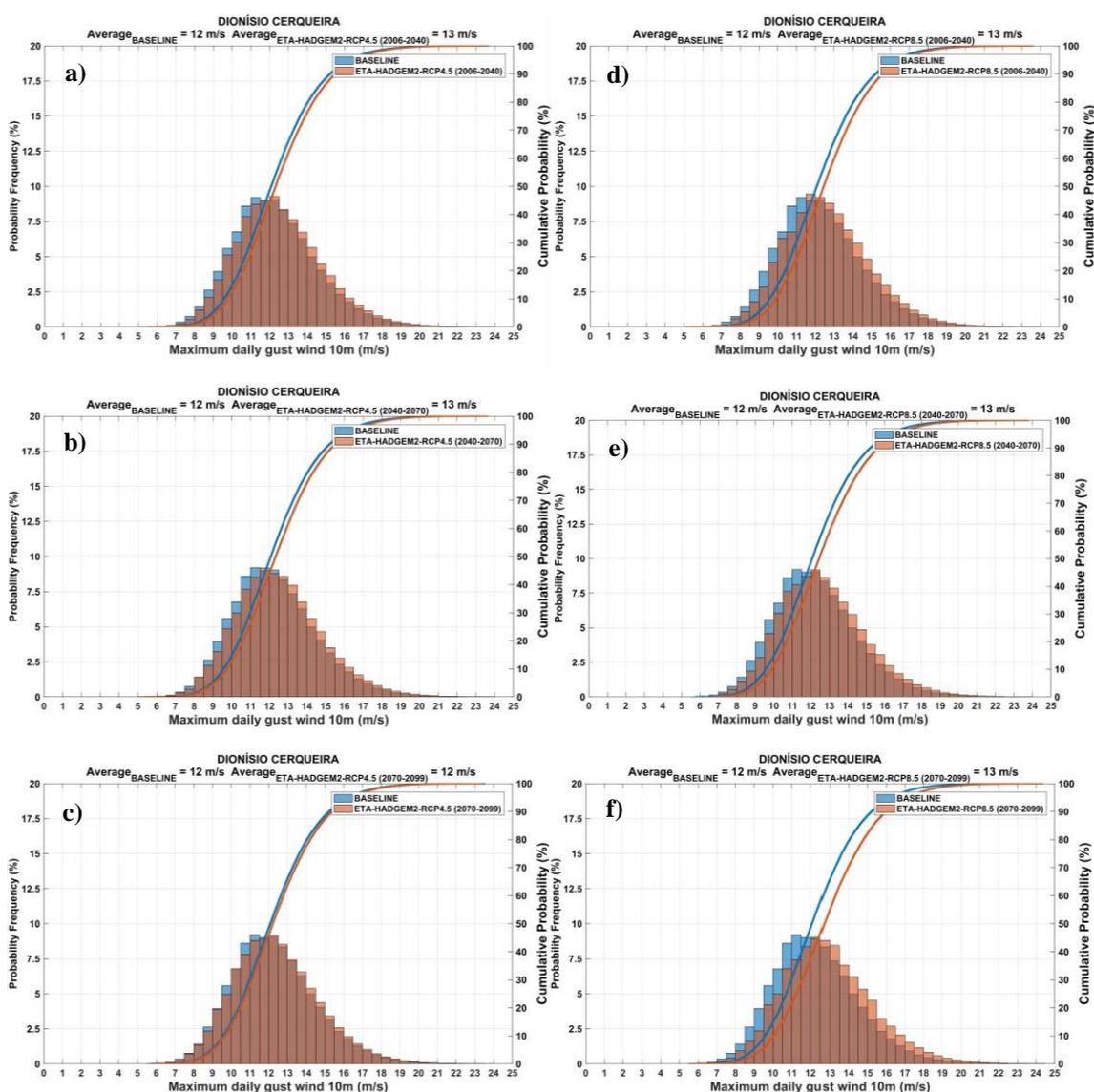


Figura 18. Distribuições de frequência e probabilidade acumulada do modelo Eta- HADGEM2-ES de rajada de vento para o período BASELINE, em azul e projeções, em laranja, estação de Dionísio Cerqueira. (a) RCP4.5 (2006-2040), b) RCP4.5 (2040-2070), c) RCP4.5 (2070-2099), d) RCP8.5 (2006-2040), e) RCP8.5 (2040-2070), f) RCP8.5 (2070-2099)).

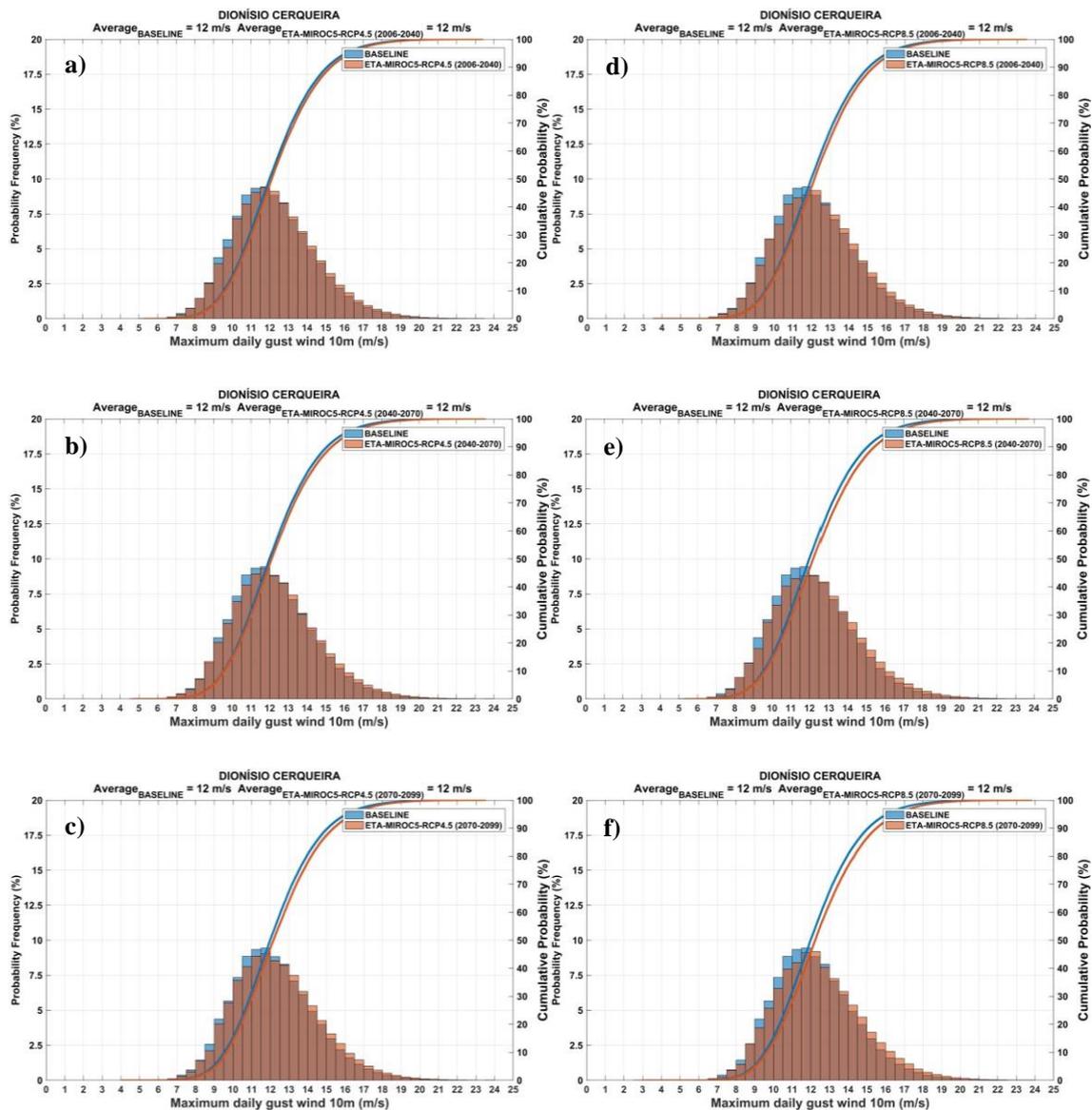


Figura 19. Distribuições de frequência e probabilidade acumulada do modelo Eta- MIROC5 de rajada de vento para o período BASELINE, em azul e projeções, em laranja, estação de Dionísio Cerqueira. (a) RCP4.5 (2006-2040), b) RCP4.5 (2040-2070), c) RCP4.5 (2070-2099), d) RCP8.5 (2006-2040), e) RCP8.5 (2040-2070), f) RCP8.5 (2070-2099)).

Na Figura 20, são apresentadas as distribuições de frequência (histogramas) e de probabilidade acumulada do modelo Eta- HADGEM2-ES para o período 2006 a 2099, para a estação de Curitiba. Nota-se que para o cenário mais otimista (RCP4.5), não se observou diferença significativa entre o período histórico e as projeções, porém quando se analisa o cenário mais pessimista (RCP8.5), observa-se um elevado aumento da rajada máxima diária no clima futuro.

Observa-se ainda que, apesar de todos os modelos apresentarem um aumento, ele é mais acentuado no Eta-HADGEM2-ES, com um aumento mais significativo no cenário RCP8.5 alterando a média em cerca de 2 m/s para os pontos analisados. A Figura 21 apresenta o mesmo tipo de análise, para as simulações do modelo Eta-MIROC5. Nota-se que o aumento se mantém nos dois cenários, sugerindo que em ambos os cenários de mudanças climáticas a região em estudo tende a experimentar um aumento na intensidade do vento de rajada.

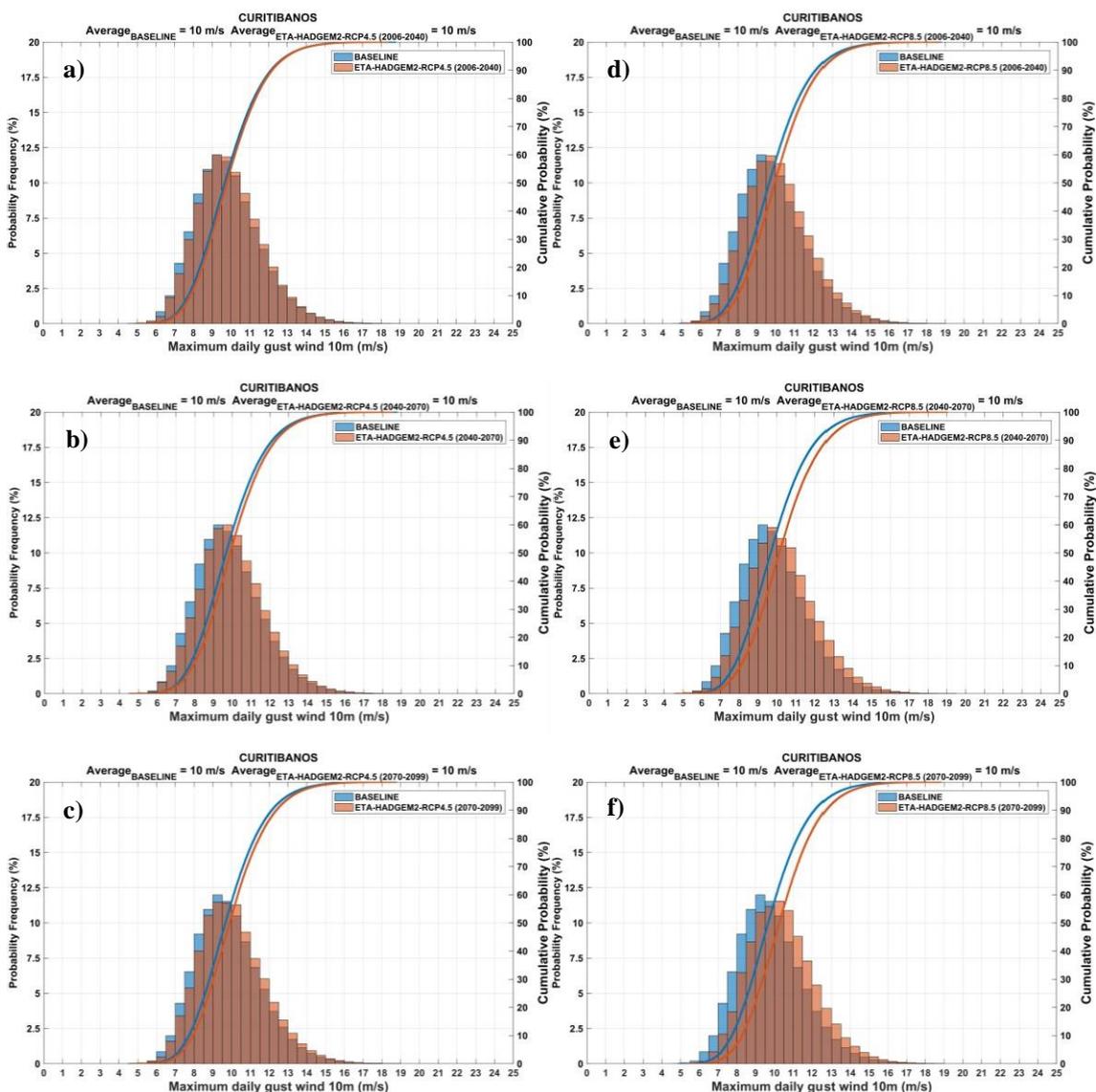


Figura 20. Distribuições de frequência e probabilidade acumulada do modelo Eta- HADGEM2-ES de rajada de vento para o período BASELINE, em azul e projeções, em laranja, estação de Curitibanos. (a) RCP4.5 (2006-2040), b) RCP4.5 (2040-2070), c) RCP4.5 (2070-2099), d) RCP8.5 (2006-2040), e) RCP8.5 (2040-2070), f) RCP8.5 (2070-2099)).

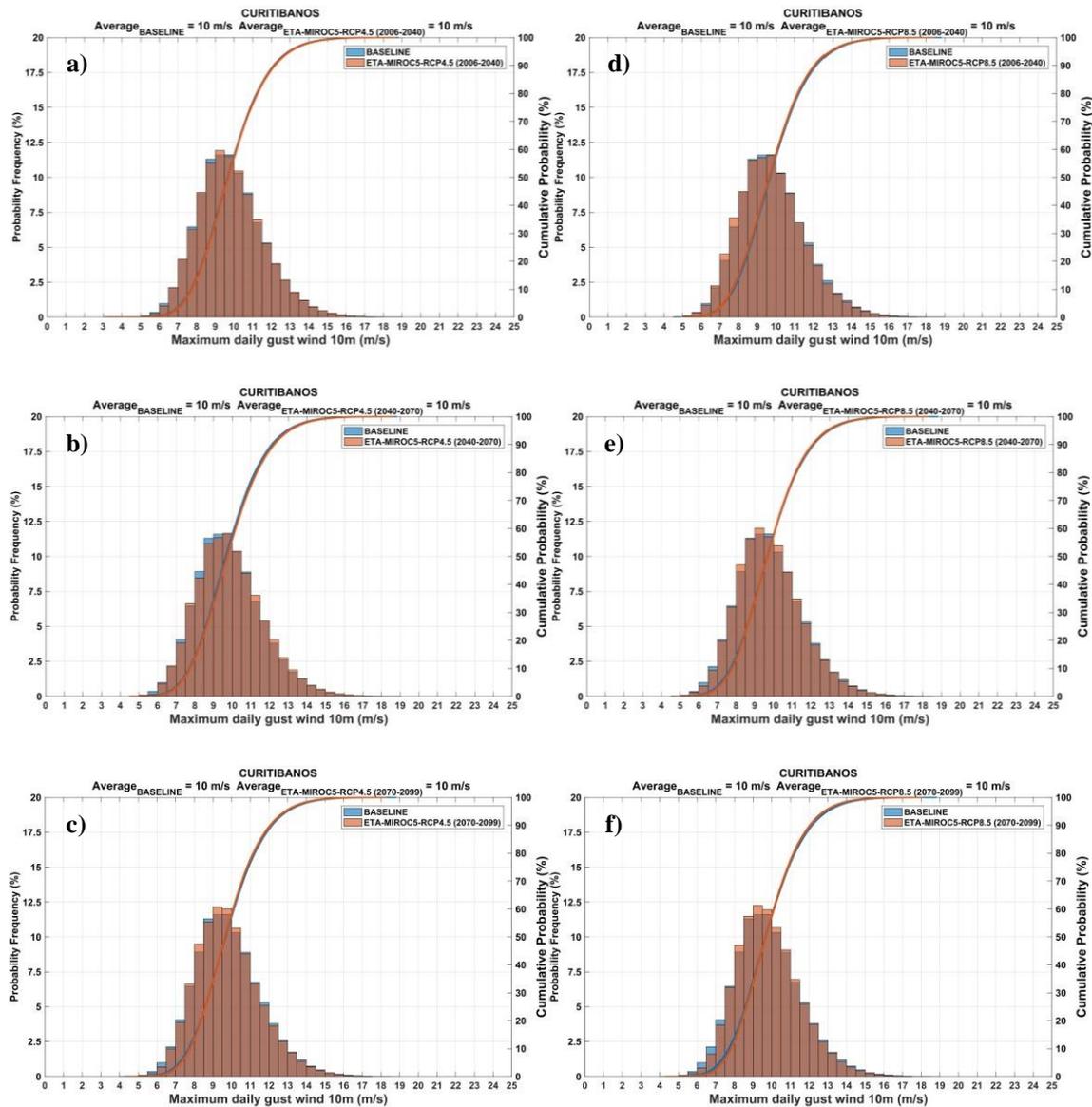


Figura 21. Distribuições de frequência e probabilidade acumulada do modelo Eta- MIROC5 de rajada de vento para o período BASELINE, em azul e projeções, em laranja, estação de Curitiba. (a) RCP4.5 (2006-2040), b) RCP4.5 (2040-2070), c) RCP4.5 (2070-2099), d) RCP8.5 (2006-2040), e) RCP8.5 (2040-2070), f) RCP8.5 (2070-2099)).

5.2. Resultados da Rajada de Vento correspondente ao Período de Retorno – T da simulada pelo Modelo Eta (Projeções)

As Figuras 21 e 22 apresentam os resultados da rajada máxima anual do vento do modelo Eta esperada para o período de retorno de até 50 anos para as estações de Dionísio Cerqueira e Curitibaanos, a escolha por essas estações foram por apresentarem um resultado mais significativos, porém as demais estações se encontram em anexo ao produto. As demais estações encontram-se em anexo a este produto. Para estas estimativas foram utilizados os dois modelos (Eta-HADGEM2-ES e Eta-MIROC5) e suas respectivas projeções para os dois cenários (RCP4.5 e RCP8.5). Foram testadas as três distribuições de probabilidade: GEV, Weibull e Gumbel, porém será mostrada apenas a GEV, sendo que as demais estão em anexo. O desempenho dos modelos é semelhante, podendo-se utilizar qualquer um dos dois para calcular o período de retorno em um ponto específico. Na Figura 21, os gráficos à esquerda mostram os resultados do modelo Eta- HADGEM2-ES, onde nota-se pequenas diferenças entre o período histórico e as projeções em ambos os cenários. A diferença mais evidente pode ser observada no período de 2070 a 2099, onde há um aumento na intensidade do vento no cenário mais pessimista (linha em azul), em relação ao período histórico, para a estação de Dionísio Cerqueira. Observou-se o mesmo comportamento para o modelo Eta-MIROC5 (gráficos a direita), porém com menor intensidade. Para a estação de Curitibaanos (Figura 22), notou-se um desempenho semelhante entre os dois modelos, com um aumento da intensidade do vento nas projeções do RCP8.5, principalmente para o modelo Eta- HADGEM2-ES no período de 2040 a 2070.

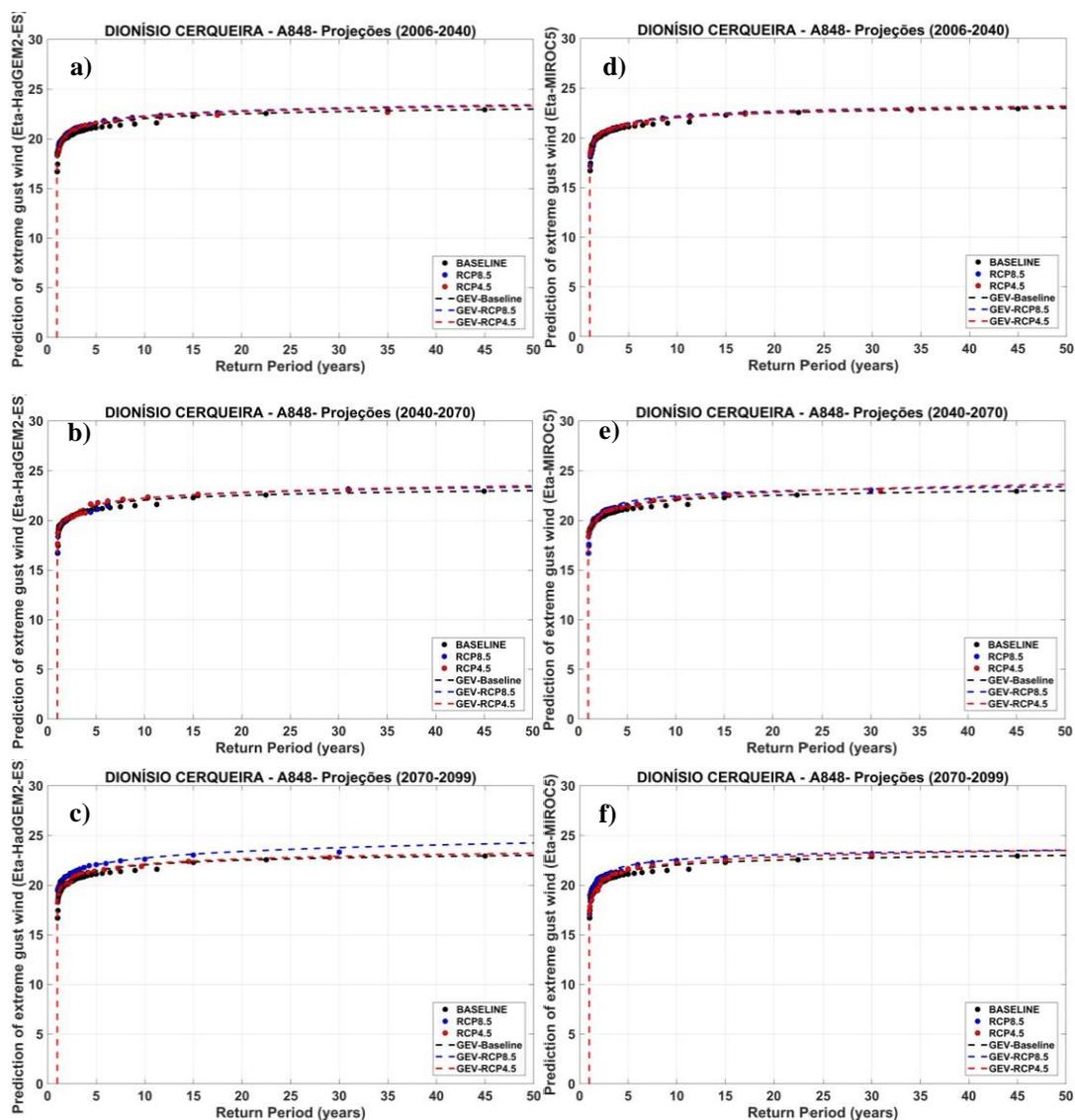


Figura 22. Período de retorno da rajada máxima anual do vento para as simulações do período histórico do modelo Eta-HadGEM2-ES (gráficos à esquerda: a, b, c) e Eta- MIROC5 (gráficos à direita: d, e, f) para a estação de Dionísio Cerqueira para três períodos futuros (2006-2040, 2040-2070 e 2070-2099).

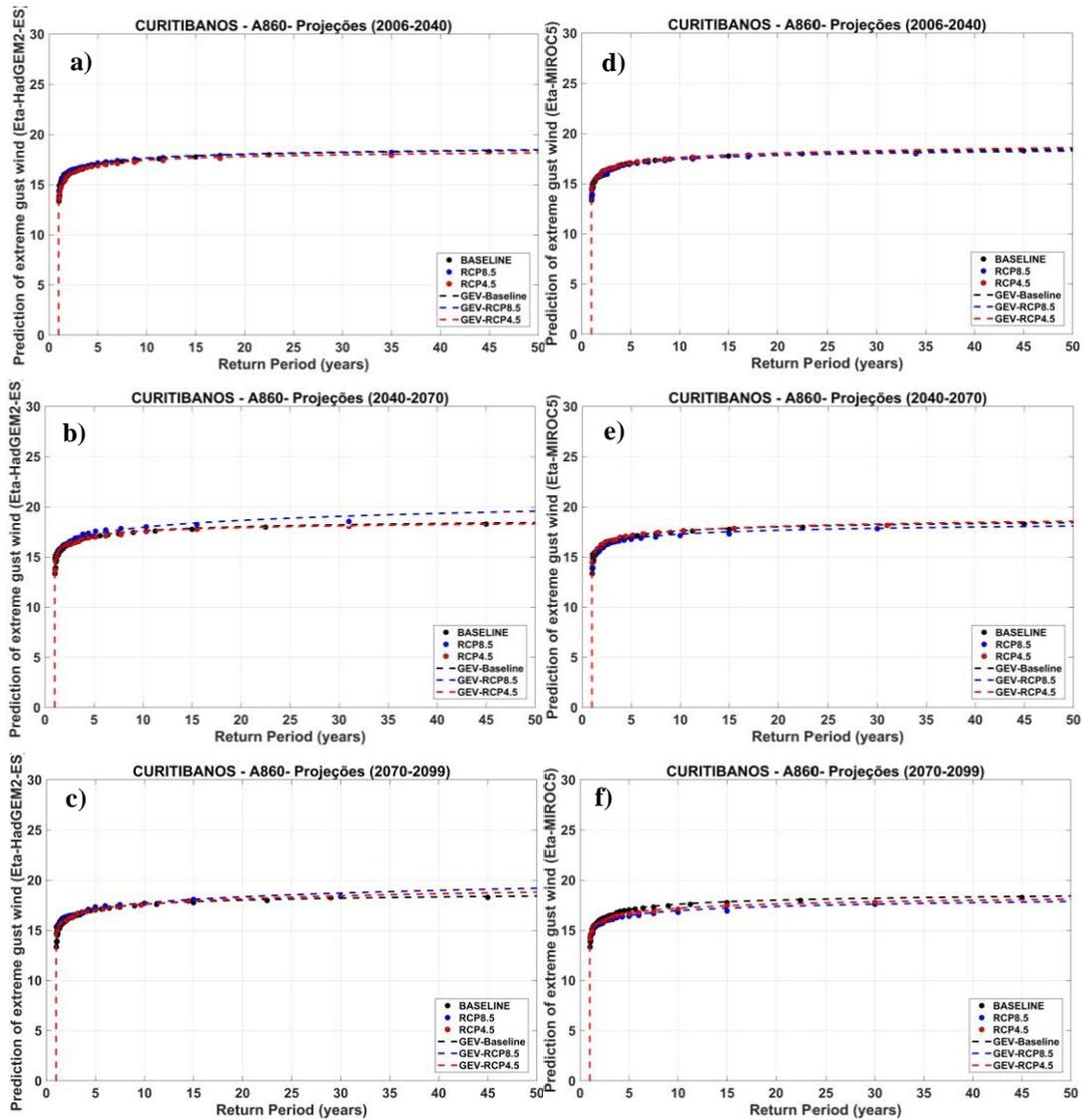
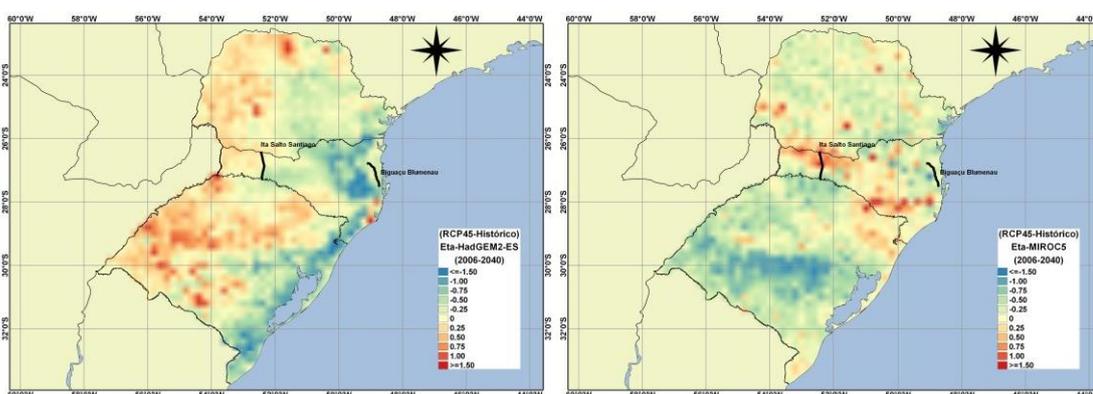


Figura 23. Período de retorno da rajada máxima anual do vento para as simulações do período histórico do modelo Eta-HadGEM2-ES (gráficos à esquerda: a, b, c) e Eta- MIROC5 (gráficos à direita: d, e, f) para a estação de Curitibanos para três períodos futuros (2006-2040, 2040-2070 e 2070-2099).

5.3. Análise Espacial da Diferença entre as Rajadas Máximas para o Período de Retorno de 50 anos do Período Histórico e das Projeções Simulado pelo Modelo ETA

Nas Figuras 24 e 25, têm-se os mapas das diferenças das rajadas máximas para os períodos de retorno de 50 anos entre o clima atual (histórico) e o clima futuro (projeções) dos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5. Valores positivos indicam que no clima futuro a intensidade do vento será maior que no clima atual, e valores negativos indicam que a intensidade do vento no clima futuro será menor do que no clima atual. De modo geral, observa-se grandes diferenças entre os modelos, tanto no que tange o aspecto quantitativo, como no que diz respeito ao padrão espacial, principalmente no cenário RCP8.5.

Na Figura 24, que mostra as projeções dos modelos para o cenário RCP4.5, foi observado uma diferença expressiva entre as partições do clima futuro. É possível observar variações positivas na intensidade do vento entre os períodos de 2006-2040, 2040-2070 e 2070-2099. É possível verificar que na região da linha de transmissão Itá- Salto Santiago, os modelos concordam no sinal de mudança no cenário RCP4.5. Já na região da linha Biguaçu-Blumenau, os modelos discordam.



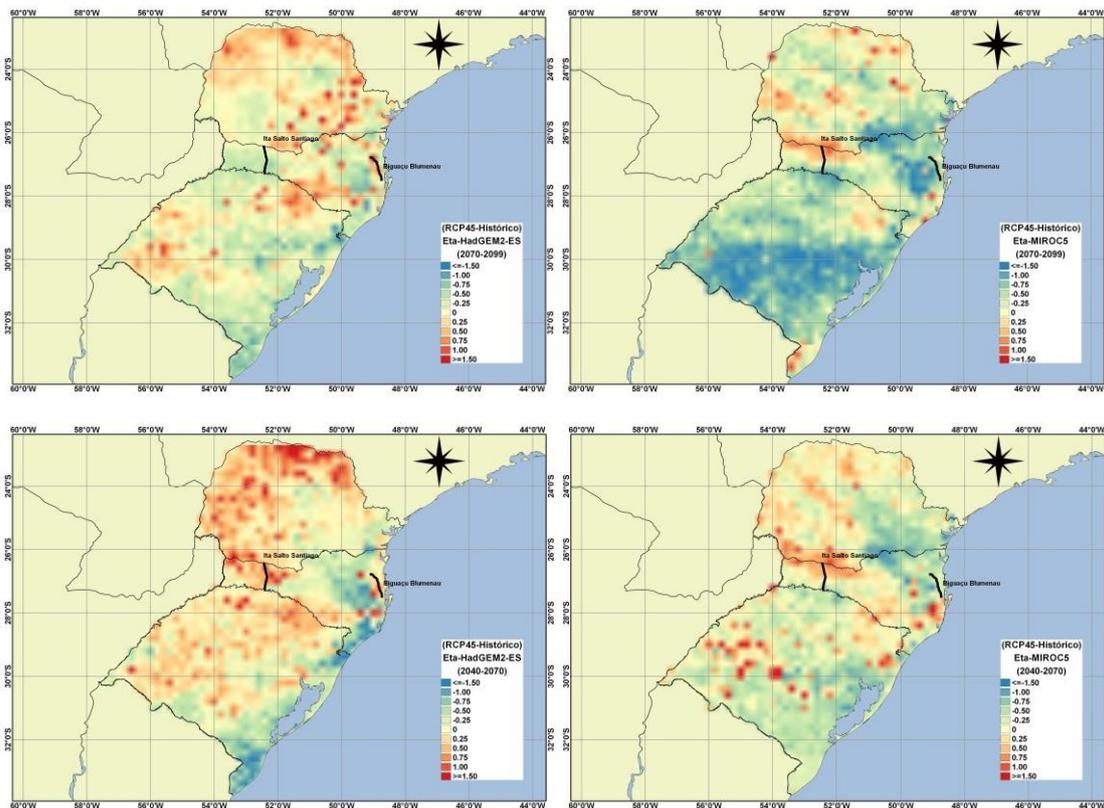


Figura 24. Diferença da rajada máxima anual do vento para o período de retorno de 50 anos entre o clima atual (histórico) e futuro (RCP4.5), simulados pelo modelo Eta- HadGEM2-ES (mapas à esquerda) e Eta-MIROC5 ES (mapas à direita) para três períodos futuros (2006-2040, 2040-2070 e 2070-2099).

Na Figura 25, são mostradas as projeções futuras estimadas pelos modelos para o cenário RCP8.5, onde foi observado um padrão espacial com tendência de aumento do valor da rajada correspondente ao período de retorno de 50 anos, no oeste da Região Sul do Brasil, e uma significativa diminuição a leste desta região. Isto pode ser mais claramente observado no cenário pessimista (RCP8.5), onde o vento tende a ficar mais intenso à medida que se aproxima do final do século. Diferenças significativas também foram verificadas entre os dois cenários analisados, no qual se pôde observar a preponderância de alterações mais acentuadas da intensidade do vento no RCP8.5 em relação ao RCP4.5. Os resultados sugerem que a Região Sul do Brasil pode

ser susceptível à ocorrência de ventos mais intensos, em um cenário futuro com maiores níveis de emissões de gases do efeito estufa, principalmente o setor oeste da Região.

Estes resultados sugerem que o oeste da Região Sul tende a apresentar maior intensidade do vento no clima futuro pelas projeções de ambos os modelos. Entretanto, com maior expressividade representada pelo modelo Eta-HadGEM2-ES que quando projetada pelo modelo Eta-MIROC5. Apesar da concordância no padrão espacial nota-se divergência nas magnitudes da alteração nas velocidades extremas do vento o que indica certo grau de incerteza quanto a intensidade desta mudança.

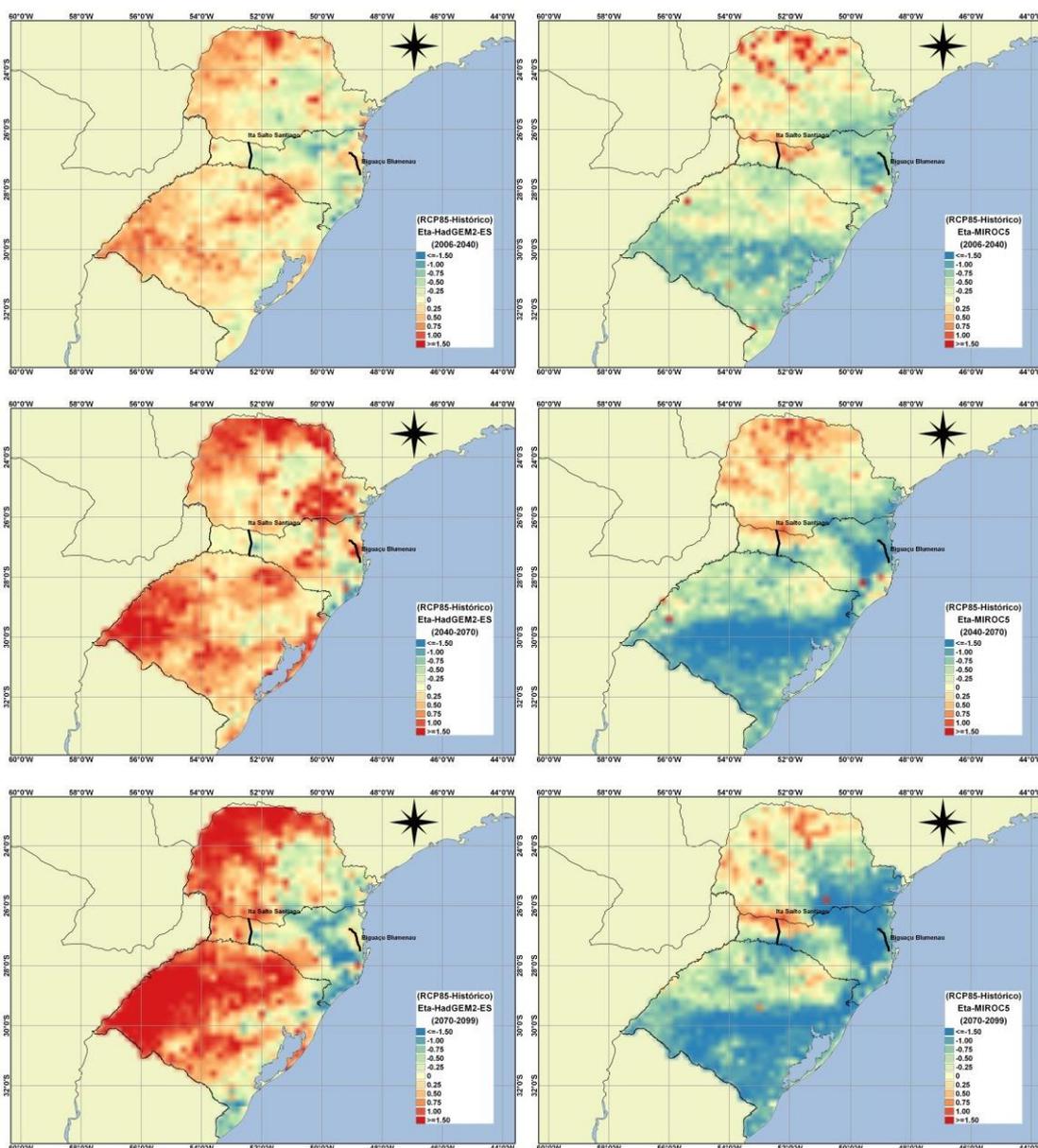


Figura 25. Diferença da rajada máxima anual do vento para o período de retorno de 50 anos entre o clima atual (histórico) e futuro (RCP.85), simulados pelo modelo Eta- HadGEM2-ES (mapas à esquerda) e Eta-MIROC5 ES (mapas à direita) para três períodos futuros (2006-2040, 2040-2070 e 2070-2099).

Nas Figuras 26 e 27 têm-se o mapa da diferença entre o 99º percentil (P99) da rajada máxima do vento do período histórico (Figura 13, Eta-HADGEM2-ES e Figura 14, Eta-MIROC5) e das projeções futuras. Ainda nestas figuras, é indicada a localização das duas linhas de transmissão, foco deste projeto: no Oeste de Santa Catarina a linha Itá-Salto Santiago e no Leste a linha Biguaçu-Blumenau. Observou-se no cenário RCP8.5 um aumento significativo da rajada a Oeste, e um leve aumento ao Leste do Estado de Santa Catarina ao longo deste século. No cenário RCP4.5 este padrão espacial também pode ser observado, porém em menor intensidade que no RCP8.5.

Na Figura 26, que mostra as projeções do modelo Eta-MIROC5, apesar de ocorrer um aumento da rajada no Oeste e uma diminuição no Leste, não se observa aumento na mesma intensidade que nas projeções do Eta-HadGEM2-ES (Figura 26), principalmente para o cenário RCP8.5. Porém, ambos os modelos e cenários mostram que os maiores valores de rajada (ou maiores alterações da rajada) ocorrerá a Oeste do Estado, onde está localizada a linha de transmissão do Ita-Salto Santiago os menores valores (ou menores alterações) são encontrados a Leste do Estado de Santa Catarina, onde se localiza a linha de Biguaçu-Blumenau. Ainda, observa-se valores intensos de vento (ou de variação) no Sudeste do Estado.

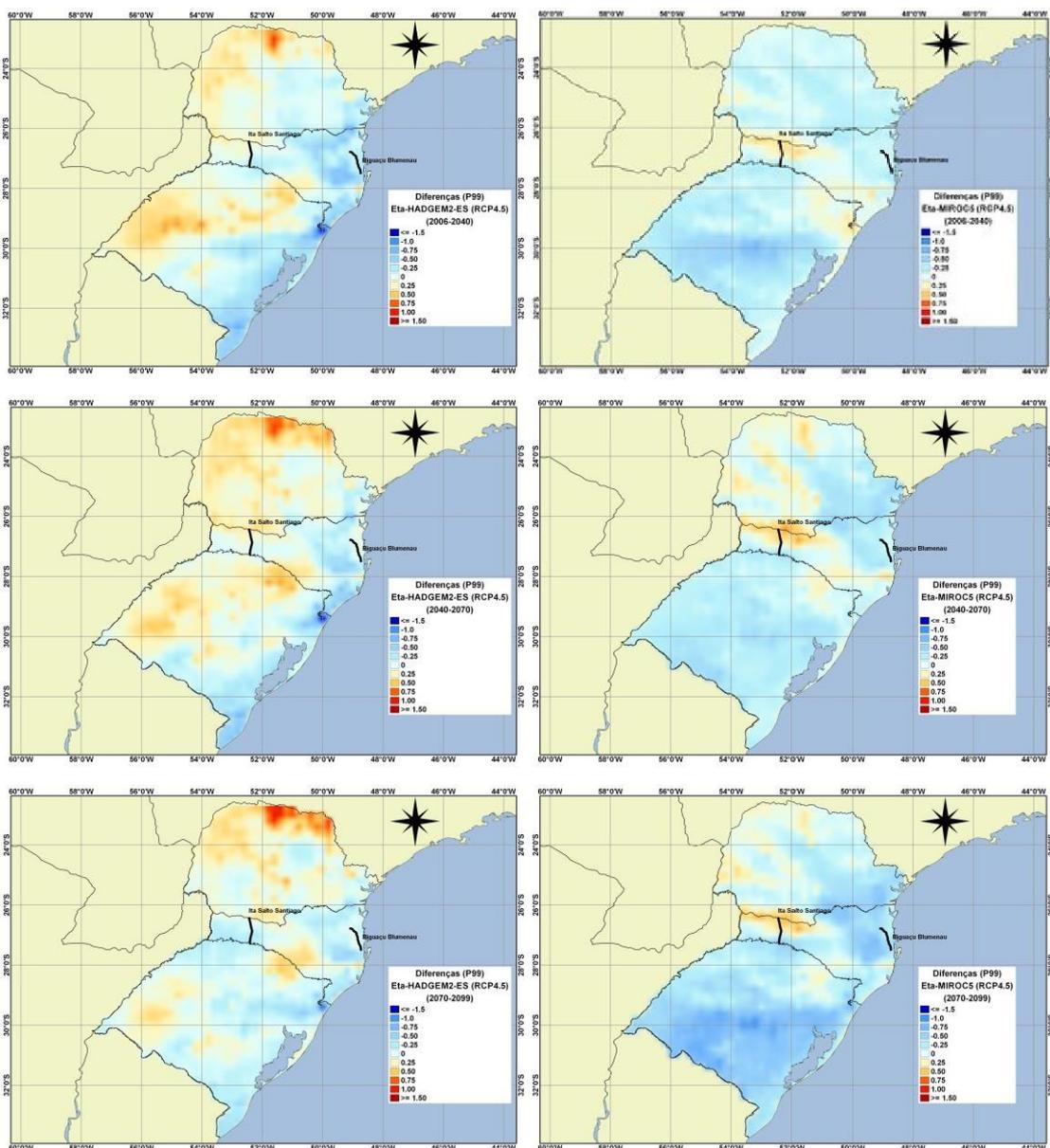
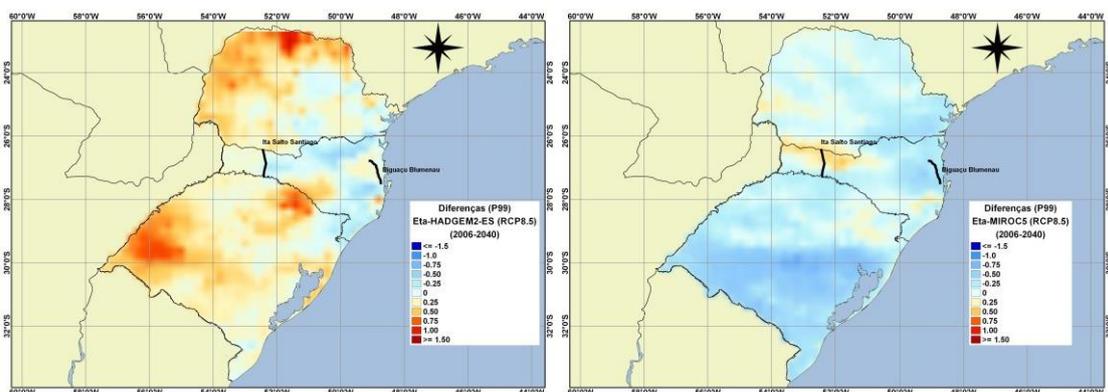


Figura 26. Diferença (RCP4.5 – Histórico) do 99 percentil (P99) da Rajada máxima do vento simulado pelo modelo Eta-HADGEM2-ES (mapas a esquerda) e pelo MIROC5 (mapas a direita) para três períodos futuros (2006-2040, 2040-2070 e 2070-2099).



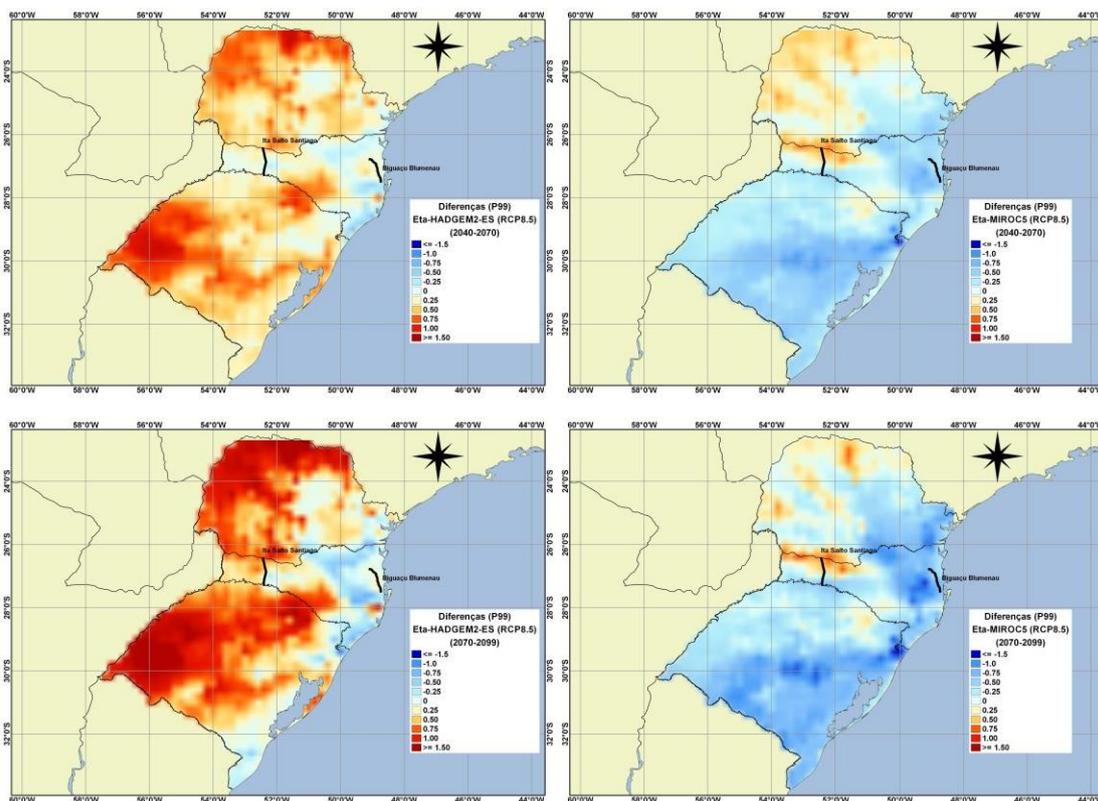


Figura 27. Diferença (RCP8.5 – Histórico) do 99 percentil (P99) da Rajada máxima do vento simulado pelo modelo Eta-HADGEM2-ES (mapas a esquerda) e pelo Eta-MIROC5 (mapas a direita) para três períodos futuros (2006-2040, 2040-2070 e 2070-2099).

Nas Figuras 28 e 29 têm-se o mapa da distribuição do índice FAR da rajada máximo do vento calculado a partir do período histórico e das projeções futuras verificadas em todo o período de dados para os modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5. O limite de referência utilizado neste trabalho foi de 20 m/s, esse limiar foi definido junto com os técnicos da Eletrosul em uma oficina realizada no dia 25 de junho de 2019, tendo em vista que os registros de rajadas acima de 25 m/s foram escassos nos dados simulados pelos modelos. Foi calculada a probabilidade de ocorrência da rajada de 20 m/s no período histórico e nas projeções, com isso calculou-se os valores de FAR indicados nas figuras abaixo. Ainda nestas figuras, são indicadas as localizações das duas linhas de foco deste projeto.

A Figura 28, ilustra os resultados para o modelo Eta-HadGEM2-ES, onde valores de FAR maiores que zero indicam que o evento se tornou mais provável devido as alterações climáticas. Analisaremos aqui

apenas valores de FAR positivo, porém os mesmos argumentos são válidos para valores negativos, que indicam diminuição de valores extremos.

Observou-se nos dois cenários RCP4.5 e RCP8.5 um valor de FAR alto no Oeste do Estado, que vai aumentando significativamente ao longo do século. Olhando o cenário mais pessimista (RCP8.5) a alteração do índice FAR fica mais evidente, que mostra um aumento em comparação ao cenário mais otimista (RCP4.5). No Leste do estado, onde está localizada a linha de Biguaçu-Blumenau, não se observa um comportamento relevante em relação ao índice. Já a linha Itá-Salto Santiago está localizada onde temos os maiores valores do índice de FAR no Estado, o que pode servir de alerta para os tomadores de decisões. Na Figura 29, tem-se as projeções do modelo Eta-MIROC5, onde apesar de mostrar um cenário mais conservador em relação ao Eta-HadGEM2-ES, apresenta o mesmo padrão espacial. Estes resultados indicam que eventos extremos de rajada de vento mais intensas são esperados a Oeste do Estado de Santa Catarina no decorrer deste século.

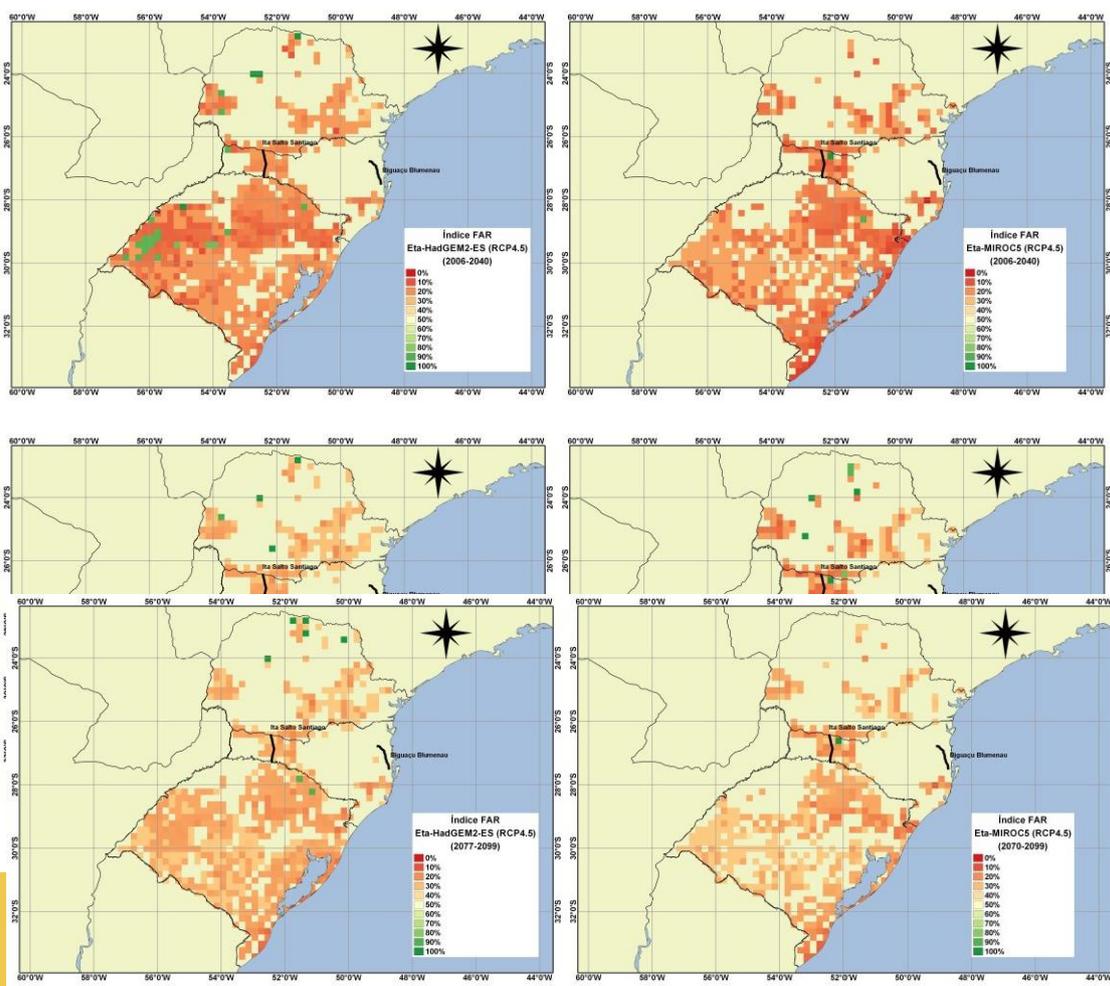


Figura 28. Mapa da variação do indicador de risco de mudanças climáticas FAR, simulado pelo modelo Eta-HadGEM2-ES (mapas a esquerda) e Eta-MIROC5 (mapas a direita) para o cenário RCP4.5 para três períodos futuros (2006-2040, 2040-2070 e 2070- 2099), correspondente ao aumento na probabilidade da rajada de vento ultrapassar os 20 m/s.

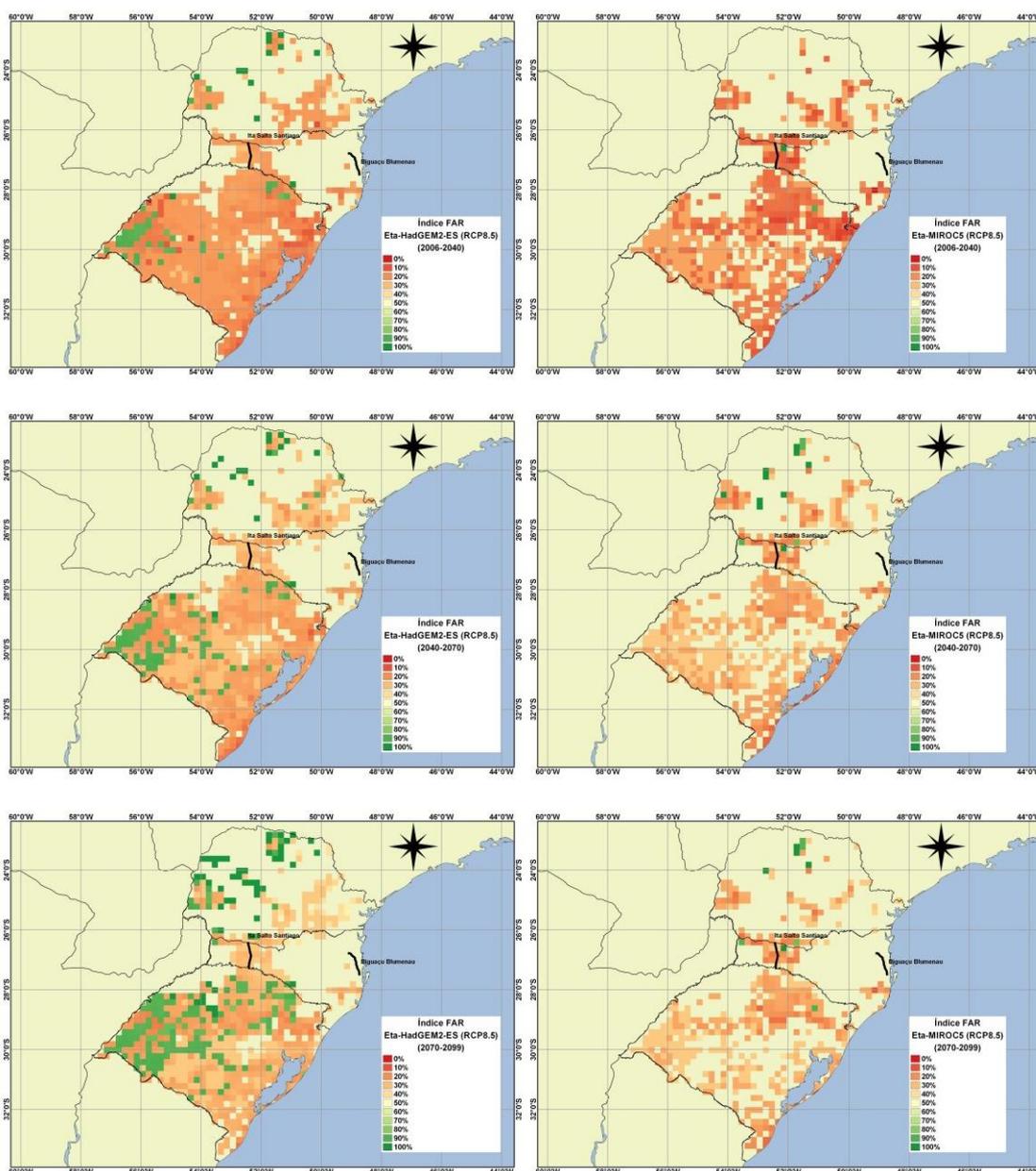


Figura 29. Mapa da variação do indicador de risco de mudanças climáticas FAR, simulado pelo modelo Eta-HadGEM2-ES (mapas a esquerda) e Eta-MIROC5 (mapas a direita) para o cenário RCP8.5 para três períodos futuros (2006-2040, 2040-2070 e 2070- 2099), correspondente ao aumento na probabilidade da rajada de vento ultrapassar os 20 m/s

6. CONCLUSÕES

O presente relatório investigou os aspectos relativos à ocorrência de ventos extremos máximos no estado de Santa Catarina a partir das projeções climáticas dos modelos Eta- HADGEM2-ES e Eta-MIROC5. Este estudo compreendeu desde a validação das rodadas históricas, correção do viés do modelo, ajuste de uma relação entre o vento médio e a rajada do vento, distribuição de eventos extremos e método estatísticos de ajuste. Os métodos de distribuição de frequência adotados apresentaram um bom ajuste às séries de rajada horária e de velocidade máxima da rajada simulado. Encontrou-se uma relação estatística preliminar entre o vento médio e o vento de rajada, o que possibilitou estimar valores mais intensos de rajada, conseqüentemente possibilitando um cálculo mais realista do período de retorno simulado pelo modelo.

As projeções mostraram um aumento da rajada máxima no Oeste do estado, onde está localizado a linha Ita Salto Santiago, e uma diminuição no Leste, onde está localizado a linha de Biguaçu Blumenau. O aumento pode ser comprovado pelos índices FAR, P99 e a frequência da rajada do vento. Com os resultados preliminares dos modelos, recomenda-se uma revisão da norma NBR 5422. Para isso é preciso aumentamos a densidade de estações anemométrica para a medição de rajada dos ventos para produzir dados de melhor qualidade e possibilitar uma norma atualização para os novos projetos de linha de transmissão no Brasil.

7. DISCUSSÕES SOBRE OS ANEXOS AO PRODUTO

Em anexo ao produto, encontra-se os arquivos em formato NETCDF que podem ser consultados em qualquer programa GIS. São arquivos que contém as rajadas máximas para os períodos de retorno de 25 e 50 anos, a frequência de ocorrência de ventos superiores a 20 m/s e 25

m/s, os ventos de rajada máximas, a média da rajada do vento e o percentil P99 dos dados de rajada do vento e o índice FAR.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. NBR 5422/1985. projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica.

Technical Report, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 1985.

ANGELI SANSIGOLO, C. DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE DE VELOCIDADE E POTÊNCIA DO VENTORevista Brasileira de Meteorologia. [s.l: s.n.].

BLACK, T. L. The New NMC Mesoscale Eta Model: Description and Forecast Examples. **Weather and Forecasting**, 1994.

CHOU, S. C. et al. Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs. **Climate Dynamics**, 2012a.

CHOU, S. C. et al. Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs. **Climate Dynamics**, 2012b.

CHOU, S. C. et al. Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. **American Journal of Climate Change**, 2014a.

CHOU, S. C. et al. Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. **American Journal of Climate Change**, 2014b.

COLLINS, W. J. et al. Geoscientific Model Development Development and evaluation of an Earth-System model-HadGEM2. **Geosci. Model Dev**, 2011.

COMPAGNUCCI, R. H.; SALLES, M. A. Surface Pressure Patterns During The Year Over Southern South America. **International Journal of Climatology**, v. 17, n. 6, p. 635–653, 1997.

DE QUADROS, L. E.; DE QUEIROZ, M. M. F.; BOAS, M. A. V. Distribuição de frequência e temporal de chuvas intensas. **Acta Scientiarum - Agronomy**, 2011.

DUKES, M. D. G.; PALUTIKOF, J. P. **Estimation of Extreme Wind Speeds with Very Long Return Periods**Journal of Applied Meteorology, 1995.

FISHER, R. A.; TIPPETT, L. H. C. Limiting forms of the frequency distribution of the largest or smallest member of a sample. **Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society**, 1928.

GILLILAND, J. M.; KEIM, B. D. Surface wind speed: trend and climatology of Brazil from 1980–2014. **International Journal of Climatology**, 2018.

GONÇALVES, R. C. **Análise de Frequência Regional de Ventos Extremos no Paraná**. [s.l: s.n.].

GUMBEL, E. J. **Statistics of extremes**. [s.l.] Dover Publications, 2004.

GUMBEL, E. J.; LIEBLEIN, J. Some Applications of Extreme-Value Methods. **American Statistician**, 1954.

HASHINO, T.; BRADLEY, A. A.; SCHWARTZ, S. S. Evaluation of bias-correction methods for ensemble streamflow volume forecasts. **Hydrology and Earth System Sciences**, 2007.

HERSHFIELD, D. M.; KOHLER, M. A. An empirical appraisal of the Gumbel extreme-value procedure. **Journal of Geophysical Research**, v. 65, n. 6, p. 1737–1746, 1 Jun. 1960.

IPCC 2013. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. **CEUR Workshop Proceedings**, 2013.

JENKINSON, A. F. The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) values of meteorological elements. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, 1955.

KATZ, R. W.; PARLANGE, M. B.; NAVEAU, P. Statistics of extremes in hydrology. **Advances in Water Resources**, 2002.

LIMA, F. J. DE L. MMA e GIZ. Produto 3: Análise de vento extremo a partir de rodadas históricas de modelos climáticos regionalizados (Eta-CPTEC) corrigidas. Ampliação dos Serviços Climáticos para Investimentos em Infraestrutura (CSI). Brasília, DF: [s.n.].

LYRA, A. et al. Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution. **Theoretical and Applied Climatology**, 2018.

MARTINS, F. R.; GUARNIERI, R. A.; PEREIRA, E. B. O aproveitamento da energia eólica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, 2008.

MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B. Enhancing information for solar and wind energy technology deployment in Brazil. **Energy Policy**, v. 39, n. 7, p. 4378–4390, 2011.

MCTI - MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, T. E I. **Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima.**

MENDES, B. V. M. **Introdução à análise de eventos extremos.** 1º ed. Rio de Janeiro . RJ: Editora E-papers, 2004.

MESINGER, F. et al. The Step-Mountain Coordinate: Model Description and Performance for Cases of Alpine Lee Cyclogenesis and for a Case of an Appalachian Redevelopment. **Monthly Weather Review**, 1988.

MINISTÉRIO DE MINAS ENERGIA. Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. **Ministério de Minas Energia**, p. 44, 2001.

MOSS, R. H. et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. **Nature**, 2010.

PES, M. P. et al. Climate trends on the extreme winds in Brazil. **Renewable Energy**, v. 109, p. 110–120, 2017.

PESQUERO, J. F. et al. Climate downscaling over South America for 1961-1970 using the Eta Model. **Theoretical and Applied Climatology**, 2010.

QUEIROZ, M. M. F.; CHAUDHRY, F. H. Análise de eventos hidrológicos extremos, usando-se a distribuição GEV e momentos LH (in Portuguese). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 2, p. 381–389, 2006.

REISS, R. D.; THOMAS, M. **Statistical analysis of extreme values: With applications to insurance, finance, hydrology and other fields: Third edition.** [s.l:s.n.].

SANSIGOLO, C. A. Distribuições de extremos de precipitação diária, temperatura máxima e mínima e velocidade do vento em Piracicaba, SP (1917-2006). **Revista Brasileira de Meteorologia**, 2008a.

SANSIGOLO, C. A. Distribuições de extremos de precipitação diária, temperatura máxima e mínima e velocidade do vento em Piracicaba, SP (1917-2006). **Revista Brasileira de Meteorologia**, 2008b.

SCHAAKE, J. C. et al. HEPEX: The hydrological ensemble prediction experiment. **Bulletin of the American Meteorological Society**, 2007.

- STOCKER, T. F. et al. **Climate change 2013 the physical science basis: Working Group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change**. [s.l: s.n.].
- STOTT, P. A. et al. Attribution of extreme weather and climate-related events. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change**, v. 7, n. 1, p. 23–41, 2016.
- TAVARES, P. DA S. et al. Climate change impact on the potential yield of Arabica coffee in southeast Brazil. **Regional Environmental Change**, 2018.
- THRASHER, B. et al. Technical Note: Bias correcting climate model simulated daily temperature extremes with quantile mapping. **Hydrology and Earth System Sciences**, 2012.
- VAN DER AUWERA, L.; DE MEYER, F.; MALET, L. M. The Use of the Weibull Three-Parameter Model for Estimating Mean Wind Power Densities. **Journal of Applied Meteorology**, 1980.
- VIOLA, M. R. et al. Assessing climate change impacts on Upper Grande River Basin hydrology, Southeast Brazil. **International Journal of Climatology**, 2015.
- WATANABE, M. et al. Improved climate simulation by MIROC5: Mean states, variability, and climate sensitivity. **Journal of Climate**, 2010.
- WEIBULL, W. A statistical distribution function of wide applicability. **J. Appl. Mech.**, 1951.
- WOOD, A. W.; SCHAAKE, J. C. Correcting Errors in Streamflow Forecast Ensemble Mean and Spread. **Journal of Hydrometeorology**, 2008.