

CONTRATO Nº 12/2018

TDR Nº 66

ANÁLISE DOS REFLEXOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NAS METODOLOGIAS DE PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ELÉTRICOS

PRODUTO 3

MODELAGEM CLIMÁTICA PARA A GERAÇÃO ELÉTRICA

META

PROJETO DE ASSISTÊNCIA
TÉCNICA DOS SETORES DE
ENERGIA E MINERAL



BANCO MUNDIAL
BIRD • AID | GRUPO BANCO MUNDIAL

MINISTÉRIO DE
MINAS E ENERGIA



Pesquisa / Produto / Trabalho executado com recursos provenientes do Acordo de Empréstimo nº 8.095-BR, formalizado entre a República Federativa do Brasil e o Banco Internacional para Reconstrução e Desenvolvimento – BIRD, em 1º de março de 2012.

Setembro/2018

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	4
2. FUNDAMENTOS GERAIS PARA PROJEÇÕES DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS	6
2.1 Cenários de emissão	7
2.2 Modelos Climáticos Globais (MCGs).....	12
2.3 Modelos Climáticos Regionais (MCRs).....	17
2.4 Variáveis climáticas relacionadas a fontes de energia elétrica	19
3. INCERTEZAS DAS PROJEÇÕES.....	21
3.1 Fontes de incertezas climáticas.....	21
3.2 Práticas usuais para reduzir e conhecer as incertezas das simulações climáticas	25
3.2.1 Correção de “viés” nas variáveis climáticas.....	29
3.3 Incertezas em simulações do clima presente	30
4. PROJEÇÕES CLIMÁTICAS	33
4.1 Modelo climático Eta	34
4.1.1 Descrição geral	34
4.1.2 Variáveis de saída do modelo Eta	36
4.2 Projeções do quarto relatório do IPCC (AR4).....	38
4.2.1 Projeções climáticas regionalizadas para o Brasil com o AR4.....	40
4.3 Projeções do quinto relatório do IPCC (AR5)	50
4.3.1 Projeções climáticas regionalizadas para o Brasil com o AR5.....	54
4.4 Análises de eventos extremos.....	63
4.5 Projeções para a bacia do rio São Francisco	68

5. ESTUDOS DE VULNERABILIDADE NO SETOR DA ENERGIA ELÉTRICA FRENTE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS.....	75
5.1 Geração hidrelétrica.....	75
5.1.1 Contextualização para a bacia do rio São Francisco	84
5.2 Geração eólica.....	87
5.2.1 Estudos de projeção de ventos para cenários de mudanças climáticas ...	92
5.2.2 Contextualização para a bacia do rio São Francisco	107
5.3 Geração solar	110
5.3.1 Contextualização para a bacia do rio São Francisco	121
5.4 Biomassa.....	122
5.4.1 Cana-de-açúcar.....	124
5.4.2 Eucalipto	128
5.4.3 Contextualização para a bacia do rio São Francisco	131
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	132
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	136

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, uma das principais preocupações relacionadas ao clima global concerne à variabilidade climática e o quanto esta tem sido influenciada por aspectos antrópicos. Vale conceituar que a variabilidade climática é uma propriedade inerente ao sistema terrestre e causada por oscilações naturais dos padrões climáticos, como, por exemplo, o El Niño e a La Niña, que são fenômenos atmosféricos naturais, recorrentes e observados em diversas escalas espaciais. Todavia, nos últimos anos foi evidenciado com mais de 95% de confiança, que as mudanças no estado do clima devido ao aquecimento global, causado pelo aumento das emissões dos Gases de Efeito Estufa (GEE) a partir do século XVIII, têm afetado significativamente a variabilidade natural do clima.

No Brasil, as primeiras ações referentes à temática “Mudanças Climáticas” foram iniciadas com a criação da Coordenação Geral de Mudanças Globais de Clima pelo Ministério da Ciência e Tecnologia, em agosto de 1994 (PNUD, 2011). O objetivo consistia em coordenar a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (CQNUMC) no país, e desenvolver uma Primeira Comunicação realizada em âmbito nacional. A Primeira Comunicação foi apresentada na 10ª Conferência das Partes ao CQNUMC em dezembro de 2004. Como continuidade, visando à elaboração da Segunda Comunicação Nacional (SCN), um novo acordo foi fechado em 2005 com inclusão de estudos de vulnerabilidade e adaptação. Neste acordo, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) ficou responsável em realizar a modelagem regional de projeções de cenários de mudanças climáticas, além de coordenar a relação entre estes resultados, as pesquisas e, os estudos de vulnerabilidade e adaptação relativos a setores estratégicos vulneráveis. Nesse contexto, o Modelo regional Eta, rodado operacionalmente desde 1996, pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE) para previsão de tempo e clima, foi selecionado para regionalizar dinamicamente, sobre a América do Sul, os diferentes cenários climáticos propostos pelos modelos acoplados globais do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, sigla do inglês *Intergovernmental Panel on Climate Change*). Como

prosseguimento, o Eta também foi utilizado na Terceira Comunicação Nacional e subsidiou diversos estudos de impactos em setores econômicos chaves (MCTI, 2016). Com incremento da temperatura global projetado para o século XXI, os impactos associados às mudanças climáticas serão sentidos em todo o mundo e, provavelmente, terão implicações profundas na população humana e na economia (MARENGO et al., 2011b). Diante de tais perspectivas, aumentar o conhecimento de como o clima do Brasil pode mudar a médio (2050) e a longo prazo (2100) e avaliar o risco das mudanças climáticas regionais associadas aos diversos níveis de emissões de GEE, por meio de uso de modelos climáticos regionais, é altamente prioritário. Essa informação é crucial para apoiar os sistemas de tomada de decisão na formulação de estratégias de mitigação e adaptação de setores-chave, como particularmente o planejamento energético para as próximas décadas.

Mudanças no clima podem impactar os sistemas energéticos, tanto na produção de energia quanto no seu consumo (LUCENA et al., 2009; SCHAEFFER et al., 2012). O sistema elétrico brasileiro apresenta-se nos dias atuais como um sistema essencialmente hidrotérmico de grande porte, com forte predominância de usinas hidroelétricas (PEREIRA et al., 2017). No entanto, fontes renováveis como a eólica, biomassa e solar, vêm ganhando destaque nos últimos anos na composição da matriz energética brasileira. Portanto, por se tratar do aproveitamento energético de recursos que são susceptíveis às mudanças climáticas, avaliar as variáveis climáticas que as influenciam, por meios de projeções, é de extrema importância para atenuar possíveis impactos no setor. Segundo a SAE (2015), a geração de hidroeletricidade, depende do ciclo hidrológico; o plantio de biomassa depende das condições edafoclimáticas; a geração de energia eólica depende do regime de ventos e; a geração de energia solar depende da formação de nuvens, as quais impactam sobre a quantidade de radiação solar. Dessa forma, é relevante compreender as incertezas que podem haver nas projeções e também conhecer medidas que sejam capazes de reduzir estas incertezas, dando maior confiabilidade nas projeções.

Assim, no presente relatório serão abordadas questões conceituais sobre as incertezas nas projeções, mudanças climáticas, assim como projeções climáticas usando os dois últimos conjuntos de cenários utilizados na elaboração dos relatórios do IPCC, a saber: cenários *Special Report on Emissions Scenarios* (SRES) e cenários *Representative Concentration Pathways* (RCPs). Por fim, frente ao que foi discutido, como último item, é apresentado um estudo do estado da arte, referente à vulnerabilidade no setor de energia elétrica relacionada às mudanças climáticas, tendo em vista que a convergência das projeções, quando comparadas em diferentes cenários e modelos, representam um menor nível de incerteza em relação as projeções.

Vale destacar que neste Produto são analisadas, ainda, as projeções para a Bacia do São Francisco com base na literatura disponível, o que contribuirá no momento da elaboração do Produto 4 (Metodologia para Uso Consuntivo da Água).

2. FUNDAMENTOS GERAIS PARA PROJEÇÕES DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Nas últimas décadas, foram intensificadas as discussões e estudos referentes à variabilidade e às mudanças climáticas, resultando em inúmeras pesquisas que comprovaram consideráveis alterações na composição da atmosfera e, de modo consequente, nas variáveis relacionadas ao clima (OLIVEIRA; PEDROLLO; CASTRO, 2015).

O principal órgão internacional que sintetiza os estudos voltados a este tema, é o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). O IPCC foi criado em 1988, pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) e pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), com a finalidade de fornecer informações com bases científicas sobre as mudanças no clima global, de modo a avaliar seus impactos e riscos futuros e apresentar alternativas de adaptação e mitigação (IPCC, 2013).

Como já definido no Produto 2 (Estado da Arte da Vulnerabilidade do Setor Elétrico), o clima segundo Dias e Silva (2009) é caracterizado pela média das condições do tempo

ao longo do período de algumas décadas. Geralmente, é usado um período de 30 anos para se definir o clima de um determinado local. Já a mudança climática é caracterizada como uma mudança no estado (padrão) do clima, identificada por mudanças na média e/ou na variabilidade de suas propriedades climáticas e que persiste por um período de décadas ou mais. Essas mudanças podem ser provenientes de processos internos ou externas naturais, ou ainda, devido às forçantes antrópicas, com persistentes alterações na composição da atmosfera ou no uso da terra (IPCC, 2012).

Os Modelos de Circulação Global (MCGs) fornecem projeções climáticas com resolução horizontal grosseira (da ordem centenas de quilômetros), limitando sua avaliação em escala regional além da aplicação em estudos de impactos, tais como em bacias hidrográficas, zonas costeiras, áreas agrícolas, etc. Com intuito de contornar essa limitação, tem sido usada a técnica de redução de escala (*downscaling* dinâmico) a partir de Modelos Climáticos Regionais (MCRs) integrados com as saídas dos MCGs, a qual contribui para simulação mais detalhada das condições atmosféricas em mais alta resolução espacial (BÁRDOSSY; PEGRAM, 2011), o que permite a descrição das condições meteorológicas em regiões de topografia mais complexa, afetadas por heterogeneidade de cobertura da superfície, por exemplo.

2.1 Cenários de emissão

Nakicenovic et al. (2000) e Van Vuuren et al. (2011), dizem que na pesquisa climática os cenários socioeconômicos e de emissão, são usados a fim de fornecer descrições plausíveis de como o futuro pode evoluir em relação a uma série de variáveis, tais como: mudança socioeconômica, mudança tecnológica, uso de energia e solo, emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) e poluentes atmosféricos. Dizem ainda, que estes cenários podem ser usados como *input* para execuções de modelos climáticos e como base para avaliação de possíveis impactos climáticos e opções de mitigação.

O IPCC no seu *Fourth Assessment Report* – AR4 (IPCC, 2007a) apresentou quatro cenários climáticos principais. De acordo com Nakicenovic et al. (2000) e com o IPCC

(2007a), os cenários são: A1, A2, B1 e B2, sendo que o A1 se subdivide em A1F1, A1T e A1B, a saber:

- **A1:** Os cenários da família A1 descrevem um futuro com rápido crescimento econômico e grande crescimento populacional até a metade do século XXI, decaindo na segunda metade, além da introdução de novas tecnologias mais eficientes. As principais questões destes cenários são a convergência entre as regiões, o aumento das interações culturais e sociais e a redução das diferenças regionais na renda per capita. A família A1 é dividida em três cenários baseados na ênfase da mudança do setor energético. Estes cenários são: uso intensivo de combustíveis fósseis (A1FI), fontes energéticas não-fósseis (A1T) ou um equilíbrio entre todas as fontes (A1B), sendo que este último supõe que as taxas de aperfeiçoamento são aplicadas similarmente a todas as tecnologias de oferta de energia;
- **A2:** O cenário A2 descreve um mundo muito heterogêneo, tendo como principais questões a autossuficiência e a preservação das identidades locais. Os padrões de fertilidade entre as regiões convergem muito lentamente, levando ao aumento crescente da população. O desenvolvimento econômico é orientado regionalmente, sendo que, tanto o crescimento econômico per capita quanto a mudança tecnológica são mais regionais e lentos do que nos demais contextos;
- **B1:** O cenário B1 descreve um mundo convergente com grande crescimento populacional até a metade do século XXI, declinando em seguida (assim como os cenários A1), porém com uma rápida mudança nas estruturas econômicas em direção a uma economia de serviços e informações, com reduções da intensidade material e a introdução de tecnologias limpas e eficientes com relação ao uso dos recursos. A ênfase está nas soluções globais para a sustentabilidade econômica, social e ambiental, até mesmo na melhoria da igualdade, entretanto sem acréscimo de iniciativas relacionadas com o clima;
- **B2:** O cenário B2 descreve um mundo com destaque em soluções locais para a sustentabilidade econômica, assim como social e ambiental. Neste cenário, a

população global aumenta continuamente, a uma taxa inferior a do A2, com níveis médios de desenvolvimento econômico e mudança tecnológica com menor velocidade e maior diversidade, se comparadas aos cenários B1 e A1. O cenário também se volta para a proteção ambiental e igualdade social, porém, com enfoque local e regional.

Já o IPCC no seu *Fifth Assessment Report - AR5* (IPCC, 2014a) utiliza quatro cenários climáticos de forçantes radiativas, os quais correspondem aos Patamares Representativos de Concentração (*representative concentration pathways - RCP*). Moss et al. (2008 apud IPCC, 2014a) e Van Vuuren et al. (2011), explicam que os RCPs são cenários que englobam séries temporais de emissões e de concentrações do conjunto completo de Gases de Efeito Estufa (GEE), aerossóis e gases quimicamente ativos, bem como a utilização/cobertura dos solos. Ao mesmo tempo, é explorada uma gama de diferentes futuros tecnológicos, socioeconômicos e políticos, os quais podem induzir a um determinado caminho de concentração dos GEE e influenciar a magnitude das mudanças climáticas (VAN VUUREN et al., 2011), assim como os cenários SRES citados anteriormente. Com relação ao significado do nome escolhido Patamar Representativo de Concentração (RCP), segundo os autores citados acima:

- **Patamar:** Ressalta que além dos níveis de concentração a longo prazo, a trajetória tomada ao longo do tempo para alcançar esse resultado também importa;
- **Representativo:** Significa que cada RCP oferece um de muitos possíveis cenários que levariam a características específicas do forçamento radiativo.

Cada cenário recebe um número junto à sigla RCP, que indica a forçante radiativa de interesse em 2100:

- **RCP2.6:** Cenário em que o forçamento radiativo atinge, aproximadamente, 3 $W.m^{-2}$ antes de retornar a 2,6 $W.m^{-2}$ em 2100 e a concentração de CO_2 equivalente girará em torno de 475 ppm, ou seja, um cenário otimista (MOSS et al., 2010). Segundo Bjørnæs (2013), este futuro exigiria: diminuição da utilização do petróleo; menor intensidade de energia; população mundial em

2100 de 9 bilhões; aumento da áreas cultiváveis devido à produção de bioenergia; criação intensiva de animais; redução de 40% nas emissões de metano; as emissões de CO₂ se manteria no nível atual até 2020, depois declinaria, e se tornariam negativas em 2100 e; as concentrações de CO₂ atingiria o pico por volta de 2050, seguido por um declínio para cerca de 400 ppm em 2100;

- **RCP4.5:** Cenário em que o forçamento radiativo será estabilizado pouco depois do ano de 2100 em 4,5 W.m⁻² e a concentração de CO₂ equivalente girará em torno de 650 ppm, sendo um cenário considerado de estabilidade intermediária (MOSS et al., 2010). Bjørnæs (2013) diz que este cenário é ambicioso com relação à redução de emissões e que, para atingir o valor proposto, no futuro teria que haver: menor intensidade de energia; programas consistentes de reflorestamento; diminuição das áreas agrícolas e de pastagens devido ao aumento de produtividade e mudanças dos hábitos alimentares; políticas climáticas rigorosas; emissões estáveis de metano e; que as emissões de CO₂ aumentariam ligeiramente, antes de o declínio começar por volta de 2040;
- **RCP6.0:** Cenário em que o forçamento radiativo será de 6,0 W.m⁻² e a concentração de CO₂ equivalente girará em torno de 800 ppm, sendo um cenário considerado de estabilidade intermediária, assim como o RCP4.5 (MOSS et al., 2010). Bjørnæs (2013), afirma que estes valores são consistentes com a aplicação de uma série de tecnologias e estratégias para reduzir as emissões de GEE e que este futuro seria consistente com: grande dependência de combustíveis fósseis; intensidade energética intermediária; aumento das áreas de cultivos agrícolas e diminuição de áreas de pastagens; estabilidade nas emissões de metano; emissões de CO₂ atingindo o pico em 2060, 75% acima dos níveis de hoje, e a partir daí, decaindo para 25% acima dos níveis atuais.
- **RCP8.5:** O forçamento radiativo será maior do que 8,5 W.m⁻² e a concentração de CO₂ equivalente superior do que 1.370 ppm, ou seja, um cenário pessimista (MOSS et al., 2010). Bjørnæs (2013) cita que este RCP é consistente com um futuro sem mudanças das políticas públicas para redução das emissões. Neste

futuro é considerado: falta de implementação de políticas climáticas; aumento de 3 vezes das emissões de CO₂ atuais até 2100; rápido aumento nas emissões de metano; aumento de áreas agrícolas e de pastagens, impulsionados pelo crescimento da população (aproximadamente 12 bilhões até 2100); menor taxa de desenvolvimento tecnológico; elevada dependência de combustíveis fósseis e; alta intensidade energética (BJØRNÆS, 2013).

Cabe salientar que no presente projeto são utilizados os cenários RCP4.5 e RCP8.5.

Para facilitar o entendimento, com relação aos valores de concentração de CO₂ dos cenários climáticos dos relatórios já realizados pelo IPCC, pode-se observar a Figura 1. A Figura 1a mostra a comparação das projeções dos relatórios já realizados pelo IPCC, em que as concentrações globais anuais de CO₂ observadas, são apresentadas em azul escuro (IPCC, 2013a). O sombreado mostra o maior intervalo previsto de concentrações anuais globais de CO₂ de 1950 a 2035 a partir do FAR (Primeiro Relatório de Avaliação do IPCC de 1990), SAR (Segundo Relatório de Avaliação do IPCC de 1996); TAR (Terceiro Relatório de Avaliação do IPCC de 2001) e para os cenários do AR4 (A2, A1B e B1 do Quarto Relatório de Avaliação do IPCC de 2007). A Figura 1b, representa as mesmas concentrações de CO₂ observadas calculadas globalmente e as projeções do quinto relatório. Segundo o IPCC (2013a), apenas o RCP8.5 tem uma variedade de valores, porque os cenários impulsionados por emissões foram realizados apenas para este RCP. Para os outros RCPs é dada a melhor estimativa.

Pode-se notar um aumento de forma constante da concentração observada de CO₂ atmosférico entre o período de 1950 a 2011. Ao observar o período de 1990 a 2011, conclui-se que a curva do aumento observado na concentração de CO₂ encontra-se dentro da faixa de valores projetados pelo conjunto de cenários utilizados nos primeiros quatro relatórios de avaliação do IPCC e possui uma curva que acompanha o cenário A2, que seria um cenário pessimista do AR4. Com relação aos resultados do Quinto Relatório de Avaliação do IPCC (AR5) (Figura 1b), nota-se que ele acompanha os valores projetados pelos cenários do AR4.

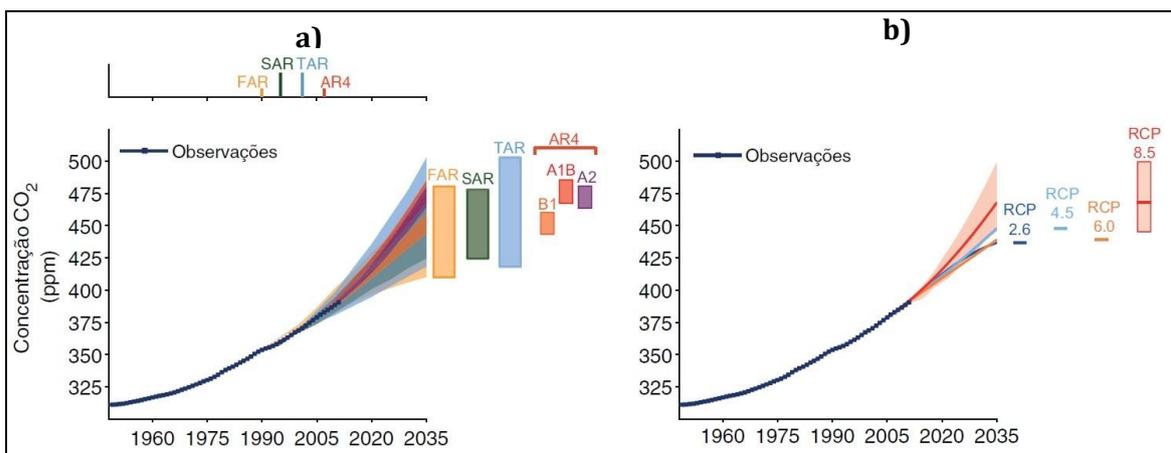


Figura 1 - Concentrações de CO₂ observadas e calculadas global e anualmente em partes por milhão (ppm) desde 1950 em comparação com as projeções das avaliações anteriores do IPCC.

Fonte: IPCC (2013a).

2.2 Modelos Climáticos Globais (MCGs)

Os Modelos de Circulação Geral da Atmosfera (MCGAs), também chamados de Modelos Climáticos Globais (MCG), são modelos numéricos que representam matematicamente os processos físicos e químicos internos da atmosfera e suas interações entre os componentes do sistema climático global, especificamente atmosfera, biosfera, criosfera, hidrosfera e litosfera (*MAS Glossary*, 200 apud MARENGO et al., 2014). Segundo Sampaio e Dias (2014), esses modelos permitem prever com elevado grau de confiança, as condições do tempo para vários dias (de 7 a 12 dias), dependendo da região e do estado da atmosfera. Também podem ser utilizados para simular características do clima passado, gerar previsão climáticas de curto prazo (próximos 3 ou 4 meses) e gerar projeções do clima futuro (para o período de décadas a séculos) levando em conta cenários de emissão dos GEE.

A evolução dos modelos globais a partir da década de 1970 até o presente, mostrando como os diferentes componentes foram acoplados em modelos climáticos abrangentes ao longo do tempo, pode ser vista na Figura 2.

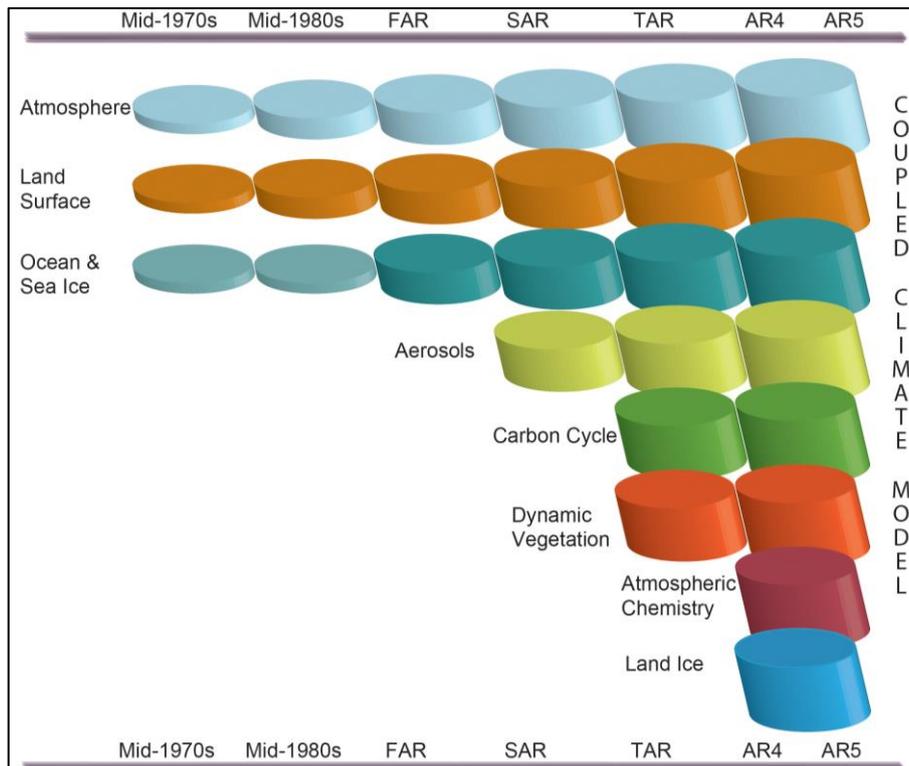


Figura 2 - A evolução da modelagem climática da década de 1970 até o presente.

Fonte: Cubasch et al. (2013).

O *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* (CMIP5), foi criado para ser utilizado pelo AR5 do IPCC. Todas as saídas dos modelos que fazem parte do CMIP5 estão disponíveis para download. A lista destes modelos pode ser vista na Tabela 1. As saídas de modelos destacados em sombreado, nesta lista, podem ser usadas apenas para fins de pesquisa e educação não comerciais, desde que se referencie sobre o dado, por exemplo, em tabelas e legendas de figuras. Os “Termos de Uso” estão disponíveis no seguinte link: <<http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/terms.html>>. Para fazer o download dos dados do CMIP5, é necessário registrar-se em: <<https://esgf-node.llnl.gov/projects/esgf-llnl/>>.

Tabela 1 - Relação dos modelos globais do CMIP5, país de origem, centro de desenvolvimento e resolução espacial.

Fonte: CMIP5 (2018).

Modelo	País	Centro	Resolução
ACCESS1.0	Austrália	CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Australia), and BOM (Bureau of Meteorology, Australia)	1,25° x 1,875°
ACCESS1.3	Austrália	CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australia), and BOM (Bureau of Meteorology, Australia)	1,25° x 1,875°
BCC-CSM1.1	China	Beijing Climate Center	2,8° x 2,8°
BCC-CSM1.1	China	Beijing Climate Center	2,8° x 2,8°
BESM	Brasil	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais	0,25° x 1,0°
<u>BNU-ESM</u>	China	College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University	
CanCM4	Canadá	Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis	2,8° x 2,8°
CanESM2	Canadá	Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis	2,8° x 2,8°
CCSM4	USA	National Center for Atmospheric Research	0,9° x 1,25°
CESM1(BGC)	USA	National Center for Atmospheric Research	0,9° x 1,25°
CESM1(CAM5)	USA	National Center for Atmospheric Research	0,9° x 1,25°
CESM1(FASTCHEM)	USA	National Center for Atmospheric Research	0,9° x 1,25°
CESM1(WACCM)	USA	National Center for Atmospheric Research	0,9° x 1,25°
CMCC-CESM	Itália	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici	3,44° x 3,75°
CMCC-CM	Itália	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici	0,75° x 0,75°
CMCC-CMS	Itália	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici	3,71° x 3,75°
CNRM-CM5	França	Centre Europeen de Recherche et de Formation Avancee en Calcul Scientifique	1,4° x 1,4°
CSIRO-MK3-6-0	Austrália	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization – Mark 3.6.0	1,8° x 1,8°
EC-EARTH		European Centre for Medium Range Weather Forecasts	1,1° x 1,1°
FGOALS-G2	China	Institute of Atmospheric Physics	3,1° x 2,8°
FGOALS-S2	China	Institute of Atmospheric Physics	3,1° x 2,8°
FIO-ESM	China	The First Institute of Oceanography	2,8° x 2,8°

Modelo	País	Centro	Resolução
GFDL-CM2.1	USA	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	2° x 2,5°
GFDL-CM3	USA	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	2° x 2,5°
GFDL-ESM2G	USA	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	2° x 2,5°
GFDL-ESM2M	USA	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	2° x 2,5°
GISS-E2-H	USA	NASA Goddard Institute for Space Studies	2° x 2,5°
GISS-E2-H-CC	USA	NASA Goddard Institute for Space Studies	2° x 2,5°
GISS-E2-R	USA	NASA Goddard Institute for Space Studies	2° x 2,5°
GISS-E2-R-CC	USA	NASA Goddard Institute for Space Studies	2° x 2,5°
HadCM3	Reino Unido	Hadley Center Coupled Model Version 3	3,75° x 2,5°
HadGEM2-AO	Reino Unido	Hadley Center Global Environmental Model	1,3° x 1,9°
HadGEM2-CC	Reino Unido	Hadley Center Global Environmental Model Version 2 - Carbon Cycle (include)	1,8° x 1,2°
HadGEM2-ESS	Reino Unido	Met Office Hadley Centre	1,3° x 1,9°
inmcm4	Rússia	Institute for Numerical Mathematics – Coupled Model Ver. 4	2,0° x 1,5°
IPSL-CM5A-LR	França	Institut Pierre-Simon Laplace	1,9° x 3,8°
IPSL-CM5A-MR	França	Institut Pierre-Simon Laplace	1,3° x 2,5°
IPSL-CM5B-LR	França	Institut Pierre-Simon Laplace	1,9° x 3,8°
MIROC4h	Japão	Atmosphere and Ocean Research Institute, National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology	1,4° x 1,4°
MIROC5	Japão	Atmosphere and Ocean Research Institute, National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology	1,4° x 1,4°
MIROC-ESM-CHEM	Japão	Model for interdisciplinary Research on Climate – Earth System Model – Chemistry	2,8° x 2,8°
MIROC-ESM	Japão	Model for interdisciplinary Research on Climate – Earth System Model	2,8° x 2,8°
MPI-ESM-LR	Alemanha	Max-Planck-Institut für Meteorologie	1,9° x 1,9°
MPI-ESM-MR	Alemanha	Max-Planck-Institut für Meteorologie	1,9° x 1,9°
MPI-ESM-P	Alemanha	Max-Planck-Institut für Meteorologie	1,9° x 1,9°
MRI-CGCM3	Japão	Meteorological Research Institute	1,1° x 1,1°
NORESM1-M	Noruega	Norwegian Climate Centre	1,9° x 2,5°
NORESM1-ME	Noruega	Norwegian Climate Centre	1,9° x 2,5°

No Brasil, simulações e projeções dos modelos globais BESM, CanESM2, HadGEM2, e MIROC5, que são modelos globais do CMIP5, já vêm sendo utilizadas como condições iniciais e de fronteiras (*downscaling*) para o modelo regional Eta do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Entretanto, as projeções do BESM ainda não são liberadas ao público, pois estão em fase de avaliação.

O *Brazilian Earth System Model version 2.3.1*- BESM (NOBRE et al., 2013) é o Modelo Brasileiro do Sistema Terrestre desenvolvido por cientistas do INPE em colaboração com cientistas de outras instituições brasileiras e estrangeiras. Segundo o INPE (2018), o BESM é:

“Um conjunto de programas computacionais que acopla os componentes de superfície continental, oceano, atmosfera e química globais, com o principal objetivo de gerar cenários de mudanças climáticas com perspectiva brasileira, ao incorporar processos de formação de nuvens, dinâmica da vegetação e o conhecimento criado no país sobre a influência dos biomas brasileiros sobre o clima global. (...) O BESM fornecerá informações detalhadas sobre fenômenos tropicais importantes, que não se encontram representados em outros modelos no exterior. Entre esses fenômenos estão como exemplo as queimadas, capazes de intensificar o efeito estufa e mudar as características de chuvas e nuvens de uma determinada região e os efeitos das descargas fluviais da bacia amazônica nos ciclos biogeoquímicos marinhos.”

O modelo BESM é um modelo espectral com truncamento T62 e 28 níveis na atmosfera e, o modelo atmosférico é acoplado ao modelo oceânico MOM4 (GRIFFIES, 2009).

O modelo *Canadian Earth System Model version 2*-CanESM2 (ARORA et al., 2011) foi desenvolvido pelo Centro Canadense de Modelagem e Análise Climática (em inglês: *Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis*). Possui resolução de 2,81° de longitude por 2,81° de latitude (BARRETO; MENDES; LUCIO, 2013).

O HadGEM2-ES (MARTIN et al., 2011) faz parte de um conjunto de modelos elaborados pelo *Met Office Hadley Centre*, órgão de meteorologia do Reino Unido. É um modelo do sistema terrestre que inclui os efeitos da química e do aerossol na atmosfera para representação do gás carbono e da poluição. Possui 38 níveis na atmosfera e seu ponto de grade possui resolução N96, que equivalente a aproximadamente $1,875^\circ$ de longitude e $1,275^\circ$ de latitude (CHOU et al., 2014b), ou seja, 180 km por 130 km. Mais informações sobre o modelo HadGEM2-ES podem ser obtidas em Martin et al. (2011).

Já o MIROC5 (WATANABE et al., 2010), também conhecido como Modelo Interdisciplinar sobre Clima é um modelo desenvolvido cooperativamente pela comunidade de pesquisa japonesa: *Center for Climate System Research (CCSR)*, *University of Tokyo*; *National Institute for Environmental Studies (NIES)* e *Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology*. Simula os efeitos climáticos globais devido às condições de poluição atmosférica por aerossóis. Possui resolução T85L40, que é aproximadamente 150 km na horizontal ($\sim 1,4^\circ$ de longitude $\times 1,4^\circ$ de latitude) e possui 40 níveis verticais na atmosfera. É acoplado ao *CCSR Ocean Component Model (COCO4.5)* (HASUMI, 2015) com 50 níveis em profundidade e 1° de resolução horizontal (CHOU et al., 2014a). Uma definição mais completa, encontra-se em Watanabe et al. (2010).

Uma das melhorias destes modelos do IPCC 2014 (AR5) em relação aos modelos do IPCC 2007 (AR4) foi a melhor representação dos oceanos e os seus efeitos na camada terrestre. O projeto de P&D 10 da ANEEL 2008 denominado “Efeitos de Mudanças Climáticas no Regime Hidrológico de Bacias Hidrográficas e na Energia Assegurada de Aproveitamentos Hidrelétricos” (LIMA et al., 2014), utilizou os modelos do AR4 e, neste trabalho foram feitas algumas atualizações para os cenários AR5.

2.3 Modelos Climáticos Regionais (MCRs)

A fim de conseguir simular variáveis e fenômenos climáticos locais e regionais, foram desenvolvidos os chamados Modelos Climáticos Regionais (MCRs). Esses modelos permitem resolver processos físicos em escalas menores (de 8 ~ 40 Km) que as do MCG

(dezenas a centenas de km). De acordo com Sampaio e Dias (2014), a vantagem de utilizar MCRs está na possibilidade de conseguir um melhor detalhamento dos resultados simulados pelos MCGs com menor custo computacional. Vale lembrar, que os MCRs, são alimentados com condições iniciais e de fronteiras, advindas de MCG, método chamado de *downscaling* dinâmico, já mencionado anteriormente.

No Brasil, os principais MCRs utilizados são: o BRAMS, o RegCM, o PRECIS e o Eta.

O BRAMS é um modelo baseado no *Regional Atmospheric Modeling System* (RAMS) desenvolvido originalmente na Universidade do estado do Colorado (*Colorado State University*- CSU/EUA). Desde 2003 vem sendo adaptado para fins brasileiros, sendo desenvolvido e mantido pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) e pela Universidade de São Paulo (USP), além de outras instituições do Brasil e do exterior. BRAMS/RAMS são modelos numéricos de previsão meteorológica, preparados para simulação da circulação atmosférica, partindo de escalas hemisféricas até simulação de grandes vórtices da camada limite planetária. Este modelo tem resolução de 5 km por 5 km na horizontal e 50 a 800 metros na vertical (BRAMS, 2015).

O modelo regional RegCM (*Regional Climate Model System*), foi originalmente desenvolvido partir do modelo MM4 do *National Center for Atmospheric Research* (NCAR) e, sua última versão (RegCM4) é totalmente mantida na seção “*Earth System Physics*” (ESP) do *International Centre for Theoretical Physics* (ICTP). A primeira versão do modelo (RegCM1), foi desenvolvida em 1989, sofrendo, desde então, grandes atualizações em 1993 (RegCM2), 1999 (RegCM2.5), 2006 (RegCM3) e mais recentemente em 2010 (RegCM4). Segundo o ICTP (2014), a versão mais recente inclui grandes atualizações na estrutura do código e seus pré e pós-processadores, contendo também a inserção de novas parametrizações físicas. O modelo pode ser aplicado em qualquer região do mundo, com espaçamento de até 10 km e, para uma vasta gama de estudos, desde estudos de processos paleoclimáticos até simulação do clima futuro.

O PRECIS (*Providing Regional Climates for Impacts Studies*) é um modelo climático regional desenvolvido no *Hadley Centre of Met Office*, baseado na terceira geração do

modelo climático regional do *Hadley Centre* (HadRM3). Esse modelo climático foi desenvolvido no intuito de gerar informações sobre mudanças climáticas de qualquer região do globo e ser disponibilizado gratuitamente para países em desenvolvimento, afim de que desenvolvam cenários sobre mudanças climáticas em seus centros de pesquisa e possam ampliar seus conhecimentos sobre sua climatologia (PRECIS, 2018).

O Modelo Climático Regional Eta, que serviu de base para este trabalho e é detalhado na subseção 3.1, não difere substancialmente dos demais modelos.

2.4 Variáveis climáticas relacionadas a fontes de energia elétrica

As variáveis climáticas, de uma forma geral, afetam diretamente as fontes primárias das usinas renováveis, uma vez que em cada tipo de usina prepondera alguma variável climática.

Para energia eólica a variável velocidade média e a direção do vento, possuem grande importância e são as mais utilizadas em estudos, para que se possa definir o potencial eólico de uma região e o melhor posicionamento das turbinas para um melhor aproveitamento das mesmas. Na literatura são encontrados estudos utilizando diversas alturas do vento, as quais são referentes às alturas representadas por diferentes modelos e estas são extrapoladas para a altura de interesse em cada estudo. Outra variável importante é o valor dos extremos de vento, pois em geral as turbinas param de funcionar a partir de valores de 25 m/s (IRENA, 2018) para evitar possíveis danos e prejuízos.

No que diz respeito à energia solar, estudos como o de Ribeiro (2017) utilizado neste trabalho, afirmam que a radiação solar incidente estabelece a quantidade de energia solar potencial de determinada área, sendo, por este motivo, uma variável de relevante importância a ser utilizada.

As variáveis meteorológicas que mais afetam a biomassa são, de acordo com a literatura disponível, a temperatura e a precipitação, as quais podem influenciar a disponibilidade da matéria prima necessária para a produção de biomassa. Alterações nos padrões de chuva, assim como mudanças na temperatura de determinadas regiões,

podem fazer com que determinadas espécies vegetais que servem de combustível para esse setor energético, tornem-se escassas ou não rentáveis para produção.

Com relação à energia hidráulica, estudos como Lima et al. (2014), que avaliou apenas o efeito nas usinas hidrelétricas, apontam que dados diários de vazão advindos de estações fluviométricas na bacia hidrográfica da região de estudo são de extrema importância para o entendimento do ciclo hidrológico da bacia em questão. Entretanto, realça que as médias diárias de temperatura do ar a 2 m (°C), umidade relativa do ar (%), radiação de onda curta incidente em superfície (W/m^2 ; para o cálculo da insolação (horas/dia)), velocidade do vento a 10 metros (m/s), pressão atmosférica em superfície (kPa) e precipitação (mm) são utilizadas para alimentar o modelo hidrológico desenvolvido no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), denominado MGB-IPH, o qual realiza a modelagem de vazão para a análise da energia hidráulica.

A Tabela 2 sintetiza o tipo de energia e as variáveis sugeridas por diversos autores, para o estudo dos mesmos.

Tabela 2 - Tipo de energia e as variáveis usadas para o desenvolvimento dos estudos.

Tipo de energia	Referências	Variáveis
Eólica	MCTI (2016)	Velocidade e direção do vento a 100 metros e uso do solo.
	CEPEL (2017)	Velocidade e direção do vento e desvio padrão da velocidade, nas seguintes alturas: 32,2; 80,5; 120,1; 160 e 200 metros.
	Eichelbergr et al. (2008), Lucena et al. (2010) e Pereira et al. (2013)	Velocidade média anual do vento a 10 metros de altura.
	Pes et al. (2015) e Pes (2017)	Ventos extremos mínimos e máximos a 10 metros.
	Schermer et al. (2017)	Velocidade média diária do vento a 10 metros de altura.
	Reboita et al. (2018)	Velocidade sazonal do vento a 10 e 100 metros de altura.
	Ribeiro (2017)	Níveis de radiação solar incidente.

Tipo de energia	Referências	Variáveis
Solar (termelétrica)	Pereira et al. (2017)	Para o cálculo da Irradiação Solar (global horizontal, direta normal e no plano inclinado na latitude): Temperatura média do ar, cobertura de nuvens, topografia, albedo de superfície, umidade relativa e visibilidade atmosférica.
	Oscar Júnior et al. (2015)	Temperatura do ar e radiação solar incidente.
Biomassa	Assad e Pinto (2008)	Temperatura do ar a 2 metros.
	Marin et al. (2013) e Marin e Nassif (2013)	Temperatura do ar, precipitação e concentração de CO ₂ .
	Garcia et al. (2014), Pinto (2015), Collicchio et al. (2015), Santiago (2015), e Nunes e Collicchio (2016)	Temperatura do ar e precipitação.
	Evangelisa, Marin e Zullo Júnior (2009) e Baesso, Ribeiro e Silva (2010)	Temperatura do ar, precipitação e radiação solar.
Hidráulica	SAE (2015)	Temperaturas máximas e mínimas do ar e precipitação.
	Lima et al. (2014)	Para cálculo da vazão: Temperatura do ar média mensal a 2 m (°C), umidade relativa do ar (%), radiação de onda curta incidente em superfície (W/m ²), vento a 10 metros (m/s), pressão atmosférica em superfície (kPa) e precipitação (mm).

3. INCERTEZAS DAS PROJEÇÕES

3.1 Fontes de incertezas climáticas

As “incertezas” são elementos que fazem parte de qualquer projeção de mudança climática. É preciso considerar que tais projeções são produzidas a partir de modelos climáticos e que estes não podem prever com certeza um evento climático futuro (BETTS et al., 2011). Diferentemente da “previsão” de tempo, a qual tem por objetivo “diagnosticar” fenômenos meteorológicos e suas interações seguindo um calendário

(data) para ocorrência do evento, as “projeções” climáticas tem por objetivo fornecer as condições plausíveis do clima futuro (tendências) sob uma avaliação média de um período de tempo a longo prazo – geralmente são consideradas integrações multidecenais – sob cenários de emissões dos GEE. Portanto, é importante enfatizar que existem diferenças conceituais entre os termos “previsão” e “projeção”, sendo mais indicado o uso do segundo para questões relacionadas aos cenários de mudanças climáticas. Como o foco principal deste relatório são as projeções climáticas regionalizadas, serão apresentadas, a seguir, as principais fontes de incertezas nos Modelos Climáticos Regionais (MCRs).

Nos MCRs, as principais fontes de incertezas podem ser divididas em dois grupos principais (AMBRIZZI et al., 2018). O primeiro grupo é relacionado à incerteza inerente ao sistema climático e o segundo é relacionado à capacidade de reproduzir o clima. No primeiro grupo pode-se mencionar a incerteza da ação humana, incluindo as emissões e concentrações dos GEE e aerossóis, além da variabilidade natural do clima. No segundo grupo podem-se mencionar as incertezas relacionadas à modelagem do sistema climático, ou seja, a ferramenta usada para produzir as simulações (modelos numéricos). Quanto às emissões dos GEE, não é possível “prever” as mudanças nas emissões futuras, pois dependem de diversos fatores socioeconômicos, tais como composição das fontes de energia no futuro e o caminho do desenvolvimento, além de fatores como alterações demográficas (BETTS et al., 2011). Como modo de exemplificar e demonstrar as incertezas em relação às emissões, mesmo tomando um período atual – mais especificamente o ano de 2010, no estudo do MCTI (2016) foram avaliadas para o Brasil as emissões dos GEE mais importantes, especificamente: Gás Carbônico (CO₂), Metano (CH₄) e Óxido Nitroso (N₂O). Os resultados indicaram que as incertezas na emissão de CO₂, são relativamente pequenas se comparadas às emissões dos outros gases em questão, tendo maior incerteza nas áreas de mineração de carvão, extração e transporte de petróleo e gás natural. Todavia, as incertezas nas emissões de CH₄ estão entre as maiores dos três gases em questão, atingindo valores acima de 70% em setores como queima de combustíveis e mineração de carvão. Quanto às emissões de N₂O, as incertezas são em média menores do que as de CH₄, porém em alguns setores como

energia e emissões indiretas, as incertezas chegam a 100%, mostrando que ainda são necessárias melhorias nas simulações da química da atmosfera. Isso demonstra a grande complexidade em considerar as emissões de tais gases, ainda mais considerando níveis globais em projeções futuras. Em relação às concentrações dos GEE, Betts et al. (2011) menciona que:

“As emissões não se equiparam de maneira simples às concentrações presentes na atmosfera. O dióxido de carbono não sofre reações químicas na atmosfera, o que significa que tem vida relativamente longa e é eliminado apenas pelos sumidouros de carbono, especificamente os oceanos e a vegetação. Sendo assim, a projeção das concentrações futuras de GEE depende das emissões do passado, assim como das do futuro, da modelagem dos fluxos e sumidouros de carbono e de como eles podem mudar”.

Quanto à variabilidade natural do clima, é importante enfatizar que o sistema climático é complexo, não-linear e dinâmico, de modo que as variabilidades naturais afetam todos os sistemas (AMBRIZZI et al., 2018). Isto é, em termos gerais, significa dizer que é altamente sensível às mínimas mudanças que podem não ser previamente mensuradas (BETTS et al., 2011). Como exemplo, pode-se citar uma erupção vulcânica que pode ocorrer inesperadamente e afetar o clima global, como observado em grandes erupções como do vulcão filipino Pinatubo. Em 1991, o Pinatubo entrou em erupção e em poucos dias liberou grande quantidade de dióxido de enxofre. O gás se espalhou na atmosfera e se combinou com vapor d'água formando aerossóis, resultando num resfriamento global de aproximadamente 0,5°C, como demonstrado na Figura 3 (OLIVEIRA et al., 2017), em que as erupções e variações correspondentes da profundidade óptica são medidas da quantidade de radiação solar que é bloqueada através de uma coluna da atmosfera. Quanto maior o valor, menor a passagem de radiação. Já as variações da temperatura média global são desconsiderando os forçamentos solares positivos, que compensam o efeito negativo do vulcanismo.

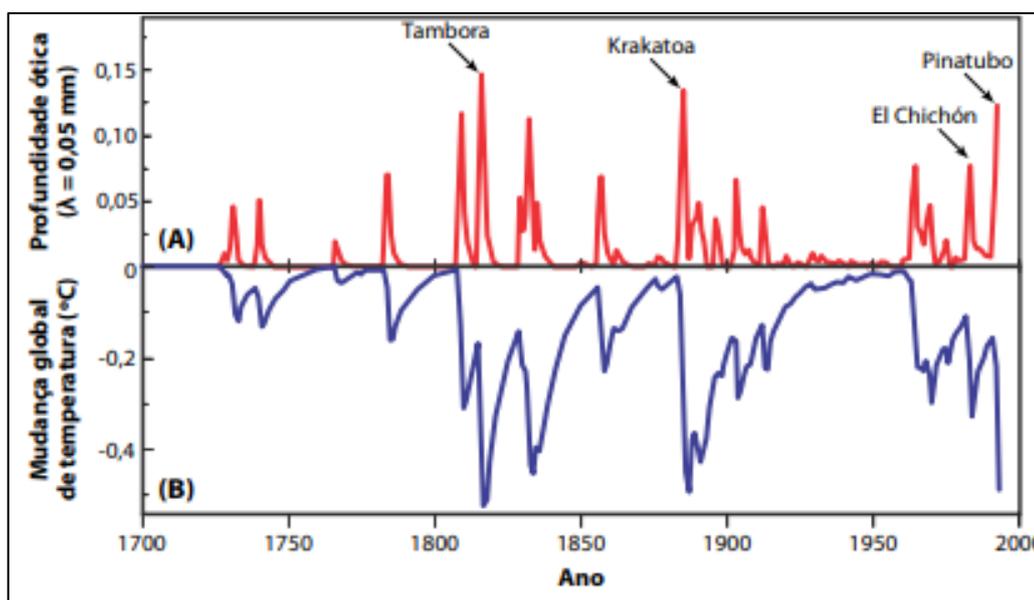


Figura 3 - Impacto de erupções vulcânicas na temperatura, no período de 1700-2000. (A) Erupções e variações correspondentes da profundidade ótica; (B) Variações da temperatura média global.

Fonte: Oliveira et al. (2017).

No grupo dois, citado por Ambrizzi et al. (2018), ou seja, relacionadas à modelagem, as incertezas ocorrem devido ao conhecimento incompleto do sistema climático, tais como as representações inadequadas das parametrizações físicas e das simulações numéricas dos modelos – chamadas de incertezas dos modelos. Na modelagem numérica da atmosfera e do sistema climático, os processos físicos ou químicos que possuem escala de tempo e comprimento menores do que as representadas pela resolução do modelo, mas que seus efeitos médios na área e no tempo não são desprezíveis, são simulados através de funções de outros parâmetros representados pelo modelo (SAMPAIO; DIAS, 2014). Esta técnica é chamada de parametrização. Segundo Sampaio e Dias (2014), os principais processos físicos parametrizados são a viscosidade, a estrutura da camada limite planetária (bem próximo da superfície), a radiação (solar e infravermelha) e a convecção associada às nuvens. Chou et al. (2014c) cita ainda outros processos e parâmetros físicos utilizados, como profundidade das raízes, rugosidade da vegetação e velocidade de queda das gotas da nuvem. As

parametrizações destas variáveis contribuem para a geração de incertezas na simulação, uma vez que são geradas a partir de outras variáveis, as quais já carregam certo nível de incerteza. Vale deixar claro também, que há vários métodos de parametrizações para as mesmas variáveis e o julgamento da escolha das parametrizações mais adequadas deve advir do pesquisador que irá realizar as simulações. Em relação à escolha da parametrização mais adequada, com intuito de diminuir as incertezas, não há uma solução unânime que resolva corretamente todos os processos físicos (CHOU; NOBRE, 2014). Uma vez que os modelos regionais podem apresentar diferentes parametrizações, configurações de grade ou parâmetros de entrada, mesmo sendo integrado para o mesmo período e forçado pelo mesmo modelo global, suas integrações produzem diferentes magnitudes e padrões de mudanças climáticas. Além das incertezas associadas às parametrizações, os MCRs também podem ter incertezas associadas ao tratamento não físico das condições de contorno lateral e as saídas dos modelos globais que são usadas como condições de contorno lateral (AMBRIZZI et al., 2018). Neste último quesito, tem-se que a qualidade das simulações de MCRs depende da qualidade dos modelos globais que fornecem as condições de contorno lateral (GIORGI; MEARNNS, 1991; SOLMAN; PESSACG, 2012; AMBRIZZI et al., 2018).

3.2 Práticas usuais para reduzir e conhecer as incertezas das simulações climáticas

Para minimizar os erros nas projeções de mudanças climáticas, os relatórios do IPCC (AR4- lançado em 2007 e AR5- lançado em 2014) são fundamentados em conjunto de projeções de modelos climáticos, técnica chamada de “*ensemble*”. A técnica de previsão numérica por *ensemble*, em português, chamada de previsão por conjunto, considera o valor médio de um conjunto de simulações. É um método consolidado que permite diminuir as incertezas nas previsões/projeções de modelos de previsão de tempo e de clima (FARINA, 2006), permitindo um resultado mais provável de acontecer (WMO, 2012). O IPCC menciona que o *ensemble* caracteriza a resposta média às forçantes externas, mas não transmite informação sobre a robustez dessa resposta entre

modelos, sua incerteza, probabilidade ou sua magnitude em relação à variabilidade climática. As incertezas dos modelos podem estar relacionadas a vários tipos de deficiências, tais como: fornecimento de condições iniciais e de fronteiras com erros, associados à própria física do modelo (incerteza estrutural) e ao comportamento caótico da atmosfera (COLLINS et al., 2014).

As simulações utilizadas para a realização do *ensemble* possuem configurações diferentes, estas diferenças podem se apresentar das seguintes formas:

- a) Pode-se usar o mesmo modelo com a mesma configuração de parametrização, mas iniciar as integrações em diferentes datas, o que perturba apenas a condição inicial (*ensemble* temporal);
- b) Pode-se usar o mesmo modelo na mesma data, alterando apenas as parametrizações físicas do modelo (*ensemble* físico). Essa abordagem é altamente útil para quantificar a variabilidade dentro do modelo (CABRÉ et al., 2016);
- c) Pode-se usar o mesmo modelo, mesclando o *ensemble* temporal e o físico;
- d) Realizando simulações com mais de um modelo (*ensemble* por múltiplos modelos), as quais são úteis para caracterizar a variabilidade entre modelos. A utilização do *ensemble* permite que as incertezas sejam suavizadas e que a média receba o valor tendencial das previsões (WMO, 2012).

Em termos de mudanças climáticas, a abordagem adotada está sendo baseada a partir de um *ensemble* de física perturbada de múltiplos modelos, realizadas com diferentes simulações de MCRs aninhados em diferentes modelos globais sob diferentes cenários de emissão dos GEE. Essa técnica tem sido utilizada para observar possíveis variações futuras no comportamento das variáveis climáticas. A partir de um conjunto de múltiplos modelos perturbados pode-se agregar resultados observando tendências que venham a se repetir. Quando existe uma tendência ao observar o comportamento das variáveis em vários modelos pode-se considerar certo grau de possibilidade de ocorrência (menor incerteza). Técnicas como a inferência bayesiana e “fuzzy sets” podem ser utilizadas para este fim.

Diversos esforços internacionais têm seguido esta abordagem, tais como os projetos citados por Ambrizzi et al. (2018) e Cabré et al. (2016), PRUDENCE (DÉQUÉ et al., 2005; GAO et al., 2006; CHRISTENSEN et al., 2007a e 2007b), ENSEMBLES (HEWITT, 2005), STARDEX (HAYLOCK et al., 2006) e CORDEX (JACOB et al., 2014) para a Europa; CORDEX (GIORGI et al., 2009) para a África; NARCCAP para América do Norte (MEARNS et al., 2012); e CREAS (MARENGO et al., 2010), CLARIS LPB (SOLMAN et al., 2013) e, CORDEX (SOLMAN, 2013) para a América do Sul. Apesar da grande importância desses projetos, a aplicação do conceito da “Quantificação da Incerteza (QI)” inerente aos modelos de sistemas climáticos está ainda engatinhando (QIAN et al., 2016). De acordo com alguns autores, a QI é ainda um ponto que precisa ser trabalhado e comentado em estudos de modelagem climática, ainda mais quando seus resultados são usados pelos tomadores de decisão (AMBRIZZI et al., 2018; QIAN et al., 2016). Todavia, é uma tarefa desafiadora, pois depende de um conjunto suficientemente grande de simulações para estimar as incertezas sem degradar a resolução ou a complexidade, além que tais incertezas dependem da variável focal e da região de estudo.

Como mencionado anteriormente, os MCRs são fortemente dependentes das condições de contorno e dos métodos usados para adequar as variáveis do modelo a menor resolução espacial dos modelos globais. Sendo assim, erros climáticos de grande escala dos modelos globais, não apenas podem ser carregados para o MCRs, mas podem ser amplificados devido sua maior resolução espacial (PIELKE SR., 2012). Por esse motivo, como modo de conhecer as incertezas das simulações, geralmente é feita a avaliação de um período presente, também chamado na literatura de *baseline*, através da comparação com dados observados, para que se possa saber se o modelo consegue capturar o comportamento da atmosfera similar ao observado e se o mesmo subestima ou superestima os valores das variáveis atmosféricas simuladas. Por consequência, levando em conta que a capacidade para simular o clima futuro seja a mesma que o presente, então dá-se maior credibilidade às projeções de clima para futuro nas regiões de menores erros (CHOU; NOBRE, 2014).

Em geral, na literatura são encontradas em maior número, validações dos modelos com relação à precipitação e temperatura do ar; já para outras variáveis meteorológicas os estudos são escassos e/ou inexistentes. Além de contribuir para análise do desempenho, as avaliações podem ser usadas também para identificar possíveis erros sistemáticos dos modelos. Tais erros, também conhecidos como vieses ou bias, são causados pela imperfeita conceituação e parametrização dos processos atmosféricos, os quais resultam em valores que são sistematicamente mais altos ou mais baixos do que os valores observados das variáveis atmosféricas (PRESTON; DIETZ, 1991). A princípio, esses erros podem e devem ser eliminados através de técnicas de correção (TEUTSCHBEI; SEIBERT, 2012; BÁRDOSSY; PEGRAM, 2011). A aplicação do método de correção de viés é uma das principais medidas para minimizar os erros nas projeções e é altamente recomendado quando se pretende usar as projeções em estudos de impactos. Algumas técnicas de correção de viés são apresentadas na subseção 3.2.1. Contudo, é importante enfatizar que, no Brasil, as avaliações dos erros por sua vez podem conter incertezas devido à qualidade das observações, principalmente devido à falta de uma boa rede observacional do ponto de vista espacial e temporal. A limitação é ainda maior quando se leva em conta outras variáveis climáticas além de precipitação e temperatura do ar, por exemplo. As incertezas dos dados observacionais podem afetar diretamente a robustez da avaliação (CHOU; NOBRE, 2014) e comprometer o desenvolvimento e melhoria dos MCRs.

Na Tabela 3 são apresentadas algumas técnicas para minimizar as incertezas recomendadas por Ambrizzi et al. (2007). Neste estudo os autores elaboraram a tabela com intuito de listar alguns dos problemas de incertezas na construção dos cenários climáticos. Assim como apresentado por Ambrizzi et al. (2007), o uso de MCRs já constitui uma das medidas para minimizar as incertezas das projeções climáticas, ainda mais quando se pretende usar em estudos de impactos locais, pois tais modelos possibilitam uma melhor representação dos processos atmosféricos que ocorrem em escalas espaciais menores, tais como nuvens, convecção e turbulência, por exemplo.

Tabela 3 - Cadeia de incertezas na construção de cenários climáticos.
Fonte: adaptado de Ambrizzi et al. (2007).

Fonte da Incerteza	Como tratar incerteza
Emissões futuras.	Utilizar modelos para uma variedade de cenários de emissão.
Taxa de emissão à concentração.	Uso de modelos de ciclo de carbono e modelos de química atmosférica.
Pouco entendimento, representação imperfeita de processos em modelos de clima (incerteza científica).	Uso de projeções de vários modelos globais de clima.
Variabilidade natural do clima.	Uso de conjunto de simulações de modelos globais de clima com várias condições iniciais.
Acrescentar detalhe espacial e temporal.	Usar MCRs + “downscaling” estatístico.

3.2.1 Correção de “viés” nas variáveis climáticas

Como os modelos apresentam incertezas em seus resultados, geradas por diferentes fatores (já abordados anteriormente), ao utilizar estas simulações para avaliações específicas, como, por exemplo, o estudo da influência das mudanças climáticas em agricultura ou geração de energia elétrica, as quais são sensíveis às variações nas variáveis meteorológicas, é indicada a correção de vieses, que são os erros sistemáticos dos modelos.

Segundo Bárdossy e Pegram (2011), os resultados dos MCRs são potencialmente úteis para avaliação de impacto climático em hidrologia, entretanto, esses modelos trazem alguns dos erros sistemáticos de subestimativa ou superestimativa das variáveis, conhecidos como “vieses” ou “bias”, dos MCGs, tornando questionável o uso direto das saídas dos MCRs em aplicações hidrológicas, uma vez que a hidrologia regional é extremamente sensível à precipitação e à temperatura, de modo que pequenos erros podem alterar o equilíbrio hidrológico. Dessa forma, as previsões do MCRs apresentam a necessidade de correções e, para isso, utilizam-se técnicas de remoção, que devem atender às características de cada variável climática.

Dentre as metodologias de correção de viés, na literatura destacam-se duas: mapeamento quantil-quantil (BÁRDOSSY; PEGRAM, 2011) e *Delta Change* (HAY et al., 2000).

- **Método da correção de viés quantil-quantil:** Proposto por Bárdossy e Pegram (2011) permite determinar os erros sistemáticos de simulações de MCRs aninhados as saídas de MCGs, supondo que os erros sistemáticos são ocasionados por um deslocamento da função de distribuição de probabilidade cumulativa, considerando a série observada e aquela prevista pelo modelo. Bárdossy e Pegram (2011) apresenta uma descrição mais detalhada;
- **Método da correção de viés *Delta Change*:** Proposto por (HAY et al., 2000) é amplamente utilizado, principalmente no estudo de vazões médias. Segundo Gellens e Roulin (1998), ele gera uma série climática baseada no cálculo de anomalia (delta) entre séries climáticas atuais e futuras, simuladas por modelos matemáticos numéricos. O valor do delta gerado é depois utilizado para perturbar a série atual e como resultado, se gera uma nova série que será utilizada para os períodos futuros (ADAM et al., 2017).

3.3 Incertezas em simulações do clima presente

Na literatura, as variáveis climáticas mais extensivamente analisadas referem-se à temperatura do ar e à precipitação. Para estas variáveis, em relação às simulações do modelo Eta (foco deste relatório), estudos foram realizados por Chou et al. (2012) e Chou et al. (2014b). No estudo de Chou et al. (2012) foram avaliadas as simulações sobre a América do Sul geradas a partir do aninhamento do modelo em quatro condições de contorno do modelo global HadCM3. Os quatro membros de perturbação da física foram utilizados com o intuito de englobar as incertezas em relação ao conjunto das simulações do modelo HadCM3. Os resultados de Chou et al. (2012) demonstram uma boa concordância nos padrões de temperatura e precipitação em relação aos dados do *Climatic Research Unit*- CRU (NEW et al., 1999), apresentando pouco espalhamento entre os membros do conjunto. Os principais erros continentais de precipitação e de temperatura foram identificados em áreas da Amazônia e do norte

da Argentina e do Paraguai. No período de verão austral (dezembro-janeiro-fevereiro), foram identificadas subestimativa da precipitação na região amazônica, mencionadas pelos autores como uma característica comum a vários experimentos de simulação e associadas aos esquemas de convecção, superfície terrestre e camada limite planetária. No estudo de Chou et al. (2014b) foram avaliadas as simulações sobre América do Sul, América Central e Caribe geradas a partir do aninhamento do modelo Eta em três modelos globais: HadGEM2-ES, BESM e MIROC5. Os resultados mostraram que as temperaturas mínimas e máximas, para todo o domínio da simulação, são geralmente subestimadas em ambas as estações do ano analisadas (verão e inverno austral), principalmente pelas integrações conduzidas pelo MIROC5. Avaliação das correlações espaciais entre as simulações e os dados observados do CRU demonstraram que a temperatura apresenta melhor concordância nas simulações conduzidas pelo MIROC5. No verão, notou-se a partir do conjunto de simulações que a precipitação é subestimada em grande parte do continente sul-americano, principalmente na região norte do Brasil. No inverno, foram identificadas superestimativas da precipitação no sul da Amazônia e subestimativa no Sul e na costa leste do nordeste do Brasil. Em todas as regiões do Brasil, as análises dos ciclos anuais mostraram que a temperatura próxima à superfície é, em média, subestimada em todo conjunto da simulação. Apesar dos erros apresentados, os autores mencionaram que as simulações aninhadas contêm as principais características da climatologia da América do Sul e América Central (CHOU et al., 2014b).

Realizando um comparativo entre as simulações de precipitação entre os dois conjuntos realizados com o Eta (CHOU et al., 2012; CHOU et al., 2014b), nota-se que o modelo apresenta um viés negativo de precipitação, ou seja, chuvas abaixo do observado, na região Amazônica no período de verão (DJF) e um viés positivo no período de inverno (JJA). Esses erros, conforme mencionado pelos autores, podem ser causados por deficiências no esquema de parametrização do modelo, isto é, são de caráter estrutural. Erros de caráter estrutural, ou seja, sistemáticos, podem ser eliminados ou minimizados por técnicas de correção de viés (conforme mencionado na

seção de incerteza). Em relação aos comparativos da temperatura próxima a superfície, nota-se que, em geral, o modelo tende a ser mais frio que as observações em praticamente todo o território brasileiro. Todavia, assim como mencionado para precipitação, ajustes nas simulações através da remoção do viés podem contribuir para resultados mais realistas.

Para outras variáveis meteorológicas de igual importância para o setor energético, existe um déficit na literatura de artigos que contemplem as análises isoladas da variável antes de ser aplicada em estudos de impactos. Para a velocidade do vento máximo e mínimo, Pes (2015) avaliou o conjunto produzido por Chou et al (2012). Todavia, o autor fez análises de caráter instantâneo, ou seja, em termos horários, o que não é indicado ao se usar as saídas do modelo Eta aninhado ao HadCM3, as quais foram produzidas de 6 em 6 horas. Para a cobertura de nuvens, Lyra (2015) fez avaliações do modelo Eta aninhado ao HadGEM2-ES comparando com dados de reanálises meteorológicas. O autor verificou que o modelo tende a apresentar menor cobertura de nuvens sobre o centro sul da Amazônia no mês de janeiro. Por outro lado, no mês de junho, o modelo apresenta uma boa concordância. Em geral, para o Brasil, Lyra (2015) ressaltou que o modelo tende a apresentar menor cobertura de nuvens que as reanálises. Para a radiação de onda curta incidente, trabalhos realizados por Hinkelman et al (1999), Chou et al. (2002) e Campos (2015) mostraram o modelo Eta utilizando o esquema de radiação do *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory*, mesmo esquema das versões utilizadas por Chou et al (2012) e Chou et al. (2014b), tende sistematicamente superestimar os fluxos de radiação solar na superfície. No entanto, vale ressaltar que o comparativo desses resultados tem que ser tomado com cautela, pois incluem simulações com diferentes versões e configurações do modelo Eta, além de diferentes condições de contorno lateral.

4. PROJEÇÕES CLIMÁTICAS

Os Modelos de Circulação Global (MCGs) fornecem projeções climáticas com resolução horizontal grosseira (da ordem centenas de quilômetros), limitando sua avaliação em escala regional além da aplicação em estudos de impactos, tais como em bacias hidrográficas, áreas urbanas, áreas agrícolas, etc. Com intuito de contornar essa limitação, tem sido usada a técnica de redução de escala, também chamada de *downscaling* dinâmico, a partir de Modelos Climáticos Regionais (MCRs) integrados com as saídas dos MCGs. Essa metodologia permite uma representação mais detalhada das características da paisagem, tais como cordilheiras, lagos e estuários, linha costeira, diferentes características e cobertura do solo, com diferentes tipos de vegetação (AMBRIZZI et al., 2018). Por conseguinte, espera-se que os MCRs possam resolver as circulações em mesoescala, como as brisas marítimas e terrestres, e representar de forma mais realista o clima regional/local em comparação com os MCGs (AMBRIZZI et al., 2018). Em geral, ocorre e pode-se dizer que os MCRs agregam valor aos resultados dos MCGs (FESER et al., 2011; RUMMUKAINEN, 2016; REBOITA et al., 2018).

Com esse pressuposto, o modelo regional Eta tem sido utilizado como uma ferramenta para regionalização dos cenários climáticos do IPCC para o Brasil. O modelo foi utilizado para apoiar a Segunda Comunicação Brasileira da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima em 2010 (MCT, 2010) e, em 2016, uma versão atualizada (MESINGER et al., 2012) foi utilizada para elaborar a Terceira Comunicação Nacional (MCTI, 2016). Na Segunda Comunicação, o modelo foi validado (CHOU et al., 2012) e gerou projeções do cenário A1B (IPCC AR4) na resolução de 40 km cobrindo toda a América do Sul (MARENGO et al., 2012). Essa versão foi também utilizada projeto de P&D 10 da ANEEL 2008 (LIMA et al., 2014) para avaliar os impactos das mudanças climáticas na geração hidráulica do país e conseqüentemente na geração total, visto que a matriz de produção de energia elétrica brasileira depende praticamente da produção hídrica. Na versão mais recente, o modelo foi integrado na resolução horizontal de 20 km e com domínio cobrindo toda América do Sul e partes

da América Central e Caribe (CHOU et al., 2014a). As projeções desta versão estenderam-se até 2100 para os cenários de concentração RCP4.5 e RCP8.5 (CHOU et al., 2014b). O clima presente (*baseline*) também foi simulado e as avaliações mostraram que o modelo apresenta boa destreza em reproduzir a sazonalidade da precipitação e temperatura do ar. Portanto, os resultados obtidos a partir da regionalização dos cenários, além de serem utilizados para apoiar a Terceira Comunicação Nacional do Brasil, têm sido utilizados em diversos estudos de impactos tais como em Viola et al. (2014), (MMA, 2016a), Silva et al. (2016), Arias (2018), Debortoli et al. (2017), Quintão et al. (2017), etc. Diante do exposto, as projeções de mudanças climáticas geradas a partir do modelo Eta são também utilizadas para alimentar modelos de vazão, tais como os que foram utilizados no P&D 10 ANEEL (LIMA et al., 2014) e, serão utilizadas no presente estudo.

4.1 Modelo climático Eta

4.1.1 Descrição geral

O modelo Eta foi desenvolvido pela Universidade de Belgrado em parceria com o Instituto Hidrometeorológico da antiga Iugoslávia (MESINGER et al., 1988; BLACK, 1994). Tornou-se operacional no Brasil no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), a partir de 1996, com o objetivo de complementar a previsão de tempo oriundas de MCGs (CHOU, 1996). Posteriormente, foi operacionalizado neste Centro para fornecer também previsões sazonais e intrasazonais (CHOU et al., 2005). Adaptações no modelo para gerar integrações multidecenais foram realizadas, inicialmente, por Pesquero et al. (2009), Chou et al. (2012) e mais recentemente por Chou et al. (2014a).

O Eta é um modelo regional em ponto de grade, também chamado de área limitada e que, portanto, necessita de modelos globais para lhe fornecer condições atmosféricas nos contornos laterais. Uma característica particular do modelo e que dá nome ao mesmo é a coordenada vertical eta (MESINGER, 1984) apropriada para operar em regiões de topografias complexas. A melhor adequação da topografia devido ao uso

desta coordena se deve a sua representação em forma de degraus discretos, o que contribui para diminuição dos erros nos cálculos obtidos de derivadas horizontais (MESINGER, 1984).

O modelo trata os processos físicos em escala de subgrade através de esquemas de parametrizações, como a maioria dos modelos de previsão numérica de tempo. O modelo resolve as misturas turbulentas na atmosfera através do esquema de Mellor-Yamada (MELLOR; YAMADA, 1982) no nível de fechamento 2.5, em que a energia cinética turbulenta é prevista. A superfície do modelo é representada pelo esquema NOAH (EK et al., 2003) com ciclo anual de vegetação verde. O esquema possui 4 camadas no solo, utiliza 9 tipos de solo e a cobertura vegetal difere em 13 tipos. A parte da chuva e das nuvens estratiformes são representadas pelo esquema de microfísica de nuvens de Ferrier et al. (2002) que trata de diferentes tipos de hidrometeoros. A precipitação convectiva é tratada pelo esquema de Betts-Miller (1986) e modificada por Janjic (1994). Os fluxos radiativos são tratados pelo esquema de Lacis-Hansen (LACIS; HANSEN, 1974), para ondas curtas, e o esquema de Fels-Schwarzkopf (FELS; SCHWARZKOPF, 1975) para ondas longas. A camada superficial baseia-se na teoria de similaridade de Monin-Obukhov e nas funções de estabilidade de Paulson (PAULSON, 1970). Aprimoramentos recentes do modelo Eta podem ser encontradas em Mesinger et al. (2012), Chou et al. (2014a) e Lyra et al. (2017).

Na versão de mudanças climáticas, a Temperatura da Superfície do Mar (TSM) é derivada de médias mensais do MCGs, que é atualizada diariamente pelo Eta através de interpolação linear. A inclusão de CO₂ no modelo é realizado através de perfis verticais de transferência radiativa (coeficientes de absorção, transmissão e emissão) compatíveis com o incremento de CO₂. A variação de CO₂ equivalente ao longo dos anos segue as concentrações utilizadas nos MCGs, que fornecem as condições de contorno. Na versão mais recente do Eta de mudanças climáticas, as integrações do modelo foram realizadas na regular horizontal de 20 km x 20 km com 38 níveis verticais, a partir do aninhamento do modelo em quatro MCGs, a saber: HadGEM2-ES - *Hadley Centre Global Environmental Model, version 2- Earth System*, MIROC5 - *Model for Interdisciplinary*

Research, version 5, CanESM2 - Canadian Earth System Model Second Generation e BESM - Brazilian Earth System Model. O domínio do modelo foi configurado para cobrir a América do Sul e partes da América Central e Caribe. O modelo foi integrado para o clima presente e para as projeções do clima futuro (2005-2100), em que as integrações foram divididas em períodos menores denominados de “*timeslice*”. O *timeslice* do clima presente abrangeu 46 anos de integração estendendo de 1960 a 2005. Nesta simulação, a concentração de CO₂ foi considerada em 360 ppm. Nas integrações do clima futuro foram considerados os seguintes *timeslices*: 2006-2040, 2041-2070 e 2071-2100. Estas projeções foram realizadas utilizando os cenários de concentração de CO₂ RCP4.5 (concentração intermediária) e RCP8.5 (alta concentração), semelhantes aos cenários anteriores (IPCC AR4) B1 e A1FI (IPCC, 2007), respectivamente. No projeto P&D 10 ANEEL (LIMA et al., 2014) foram utilizados estes três “*timeslices*” de período de 30 anos para simulação das precipitações futuras nas diversas bacias do país e conseqüentemente para as projeções das aflúncias futuras utilizando modelos chuva-vazão.

4.1.2 Variáveis de saída do modelo Eta

As projeções climáticas geram uma quantidade enorme de informações (geralmente são realizadas integrações de 140 anos, 1960 até 2100), o que demanda um custo computacional elevado e a necessidade de espaço em disco suficientemente grande (vários *Terabytes*) para armazenar todas as variáveis e, a frequência temporal que o modelo pode liberar. Devido a este grande volume de dados e o tempo de processamento geralmente optam-se, por disponibilizar saídas das variáveis meteorológicas mais utilizadas.

O modelo Eta aninhado aos modelos globais HadGEM2-ES, MIROC5, CanESM2 e BESM, possui uma lista de 45 variáveis de saída, conforme apresentada na Tabela 4. Destas 45 variáveis, 7 são disponibilizadas em 20 níveis de pressão (variáveis tridimensionais) com frequência temporal de 6 em 6 horas. As variáveis de superfície (bidimensionais) são disponibilizadas na frequência temporal de 3 em 3 horas.

Tabela 4 - Variáveis de saídas do modelo Eta de mudanças climáticas.

Variável	Níveis	Descrição	Unid.	Variável	Níveis	Descrição	Unid.	hPa
PSLM	-	Pressão no Nível Médio do Mar	hPa	RNOF	-	Runoff a Superfície 3 h	m	50
PSLC	-	Pressão à Superfície	hPa	RNSG	-	Runoff Subterrâneo 3 h	m	100
TP2M	-	Temperatura do ar a 2 m	K	EVPP	-	Evapotranspiração Potencial à Superfície	m	150
MXTP	-	Temperatura Máxima das 3 h	K	LWNV	-	Fração de Nuvens Baixas	0-1	200
MNTP	-	Temperatura Mínima das 3 h	K	MDNV	-	Fração de Nuvens Médias	0-1	250
DP2M	-	Temperatura do Ponto de Orvalho a 2 m	K	HINV	-	Fração de Nuvens Altas	0-1	300
U10M	-	Vento Zonal a 10 m	m/s	OCIS	-	Radiação de Onda Curta Incidente à Superfície	W/m ²	350
V10M	-	Vento Meridional a 10 m	m/s	OLIS	-	Radiação de onda longa incidente à Superfície	W/m ²	400
U100	-	Vento Zonal a 100 m	m/s	OCES	-	Radiação de onda curta Emergente à Superfície	W/m ²	450
V100	-	Vento Meridional a 100 m	m/s	OLES	-	Radiação de onda Longa Emergente à Superfície	W/m ²	500
PREC	-	Precipitação Total 3 h	m	ROCE	-	Radiação de onda Curta Emergente TOA	W/m ²	550
PRCV	-	Precipitação Convectiva 3 h	m	ROLE	-	Radiação de onda Longa Emergente TOA	W/m ²	600
PRGE	-	Precipitação de Microfísica 3 h	m	ALBE	-	Albedo de Superfície	0-1	650
NEVE	-	Neve Acumulada em 3 h	m	CAPE	-	CAPE	J/kg	700
CLSF	-	Fluxo de Calor Latente à Superfície	W/m ²	AGPL	-	Água Precipitável	mm	750
CSSF	-	Fluxo de Calor Sensível à Superfície	W/m ²	ZGEO	20	Altura Geopotencial	m	800
GHFL	-	Fluxo de Calor no Solo	W/m ²	UVEL	20	Vento Zonal	m/s	850
TSFC	-	Temperatura da Superfície	K	VVEL	20	Vento Meridional	m/s	900
TGSC	-	Temperatura do Solo 0.1 m	K	TEMP	20	Temperatura	K	925
TGRZ	-	Temperatura do Solo 0.4 m	K	UMRL	20	Umidade Relativa	%	1000
USSL	-	Umidade do Solo Cont. 0.1 m	0-1	OMEG	20	Ômega	hPa/s	
UZRS	-	Umidade do Solo Cont. 0.4 m	0-1	UMES	20	Umidade Específica	kg/kg	
SMAV	-	Umidade do Solo Disponível	0-1					

4.2 Projeções do quarto relatório do IPCC (AR4)

Os primeiros passos dado para obter informações científicas sobre a influência antrópica na variabilidade natural do clima foram tomados em 1988, por meio da criação do IPCC. O objetivo do IPCC consistia (e ainda consiste) em estudar e divulgar abertamente as informações tecnocientíficas e socioeconômicas, assim como os impactos relevantes aos riscos à humanidade, visando criar mecanismos para a adaptação e mitigação dos efeitos das mudanças climáticas globais. Desde o lançamento de seu primeiro relatório (FAR- *First Assessment Report*), publicado em 1990, foi confirmado que a mudança climática era, de fato, uma ameaça (IPCC, 1990). No segundo relatório (SAR- *Second Assessment Report*), lançado em 1995, foi exposto que houve um aumento significativo das concentrações atmosféricas dos GEE desde a era pré-industrial, principalmente o dióxido de carbono, o qual passou de aproximadamente 280 partes por milhão (ppm) para 360 ppm (IPCC, 1996a; 1996b). No SAR, foi apresentado também que a temperatura média global havia aumentado entre 0,3°C e 0,6°C desde o século XIX, um incremento pouco provável de ser devido apenas a causas naturais. Apesar de ter sido exposto evidências das mudanças em alguns indicadores climáticos regionais ainda houve incertezas quanto à relação entre essas mudanças e as atividades humanas. Entretanto, o SAR serviu como base para acordos-chaves que levaram a adoção do Protocolo de Kyoto, em 1997, o que sinalizava a importância política destes documentos (MARENGO, 2007). O terceiro relatório (TAR- *Third Assessment Report*), lançado em 2001, revelava um aumento na temperatura global de 0,6°C com desvio padrão de 0,2°C. Neste relatório, a década de 90 foi considerada a mais quente, sendo o ano de 1998 o mais quente desde que as temperaturas começaram a ser registradas – a partir de 1861 (IPCC, 2001). Apesar ainda das incertezas, foi mostrado que o aquecimento observado nos últimos 50 anos era, provavelmente, devido às atividades humanas.

O quarto relatório (AR4 - *Assessment Report 4*), lançado em 2007, aponta com mais de 90% de confiabilidade que a maior parte do aumento da temperatura média terrestre ocorrido no século XX foi provocada por atividades humanas. As projeções do clima

futuro indicam, assim como pode ser visualizado na Figura 4, aumento médio das temperaturas globais entre 1,8°C (cenário B1) e 4,0°C (cenário A2) até 2100, podendo chegar a 6,4°C se a população e a economia continuarem a crescer rapidamente e se for mantido o consumo intenso dos combustíveis fósseis (cenário A1F). Todavia, os resultados mais confiáveis alertam para um aumento médio de 3°C, assumindo a estabilização do dióxido de carbono em 45% acima da taxa atual – cenário A1B (ALLEY et al., 2007).

Outros pontos relevantes mencionados no AR4 são: o aquecimento global foi agravado pela poluição humana, em uma escala sem precedentes, pelo menos nos últimos 20 mil anos; existe grande evidência de que o clima da Terra está sofrendo uma transformação drástica em razão das atividades humanas; a temperatura média planetária subirá entre 2°C e 4,5°C, no século XXI, como resultado da duplicação das concentrações de dióxido de carbono na atmosfera em relação aos níveis pré-industriais, devido a emissões antrópicas, tais como a queima de petróleo e carvão e o desmatamento das florestas tropicais como, por exemplo, a Floresta Amazônica; projeção de incremento de 1,5°C em decorrência dos *feedbacks* positivos do clima, resultantes do derretimento do gelo marinho, do *permafrost* – solo e subsolo permanentemente congelado e da acidificação dos oceanos; a mudança do clima deve continuar por décadas/provavelmente séculos, mesmo se as emissões do GEE forem cessadas.

A Figura 4 apresenta as projeções para diferentes cenários, das médias globais do aquecimento da superfície mostradas como continuações das simulações do século XX, em que o sombreamento denota a faixa de mais/menos um desvio-padrão para as médias anuais individuais dos modelos. A linha alaranjada representa o experimento em que as concentrações foram mantidas constantes nos valores do ano 2000. As colunas cinzas à direita indicam a melhor estimativa (linha sólida dentro de cada coluna) e a faixa provável avaliada para os seis cenários do Relatório Especial sobre Cenários de Emissões (*Special Report on Emissions Scenarios- SRES*) – IPCC 2000. A avaliação da melhor estimativa e das faixas prováveis nas colunas cinzas compreende os Modelos de Circulação Geral da Atmosfera-Oceano (AOGCMs) na parte esquerda da

figura, bem como os resultados de uma hierarquia de modelos independentes e restrições das observações.

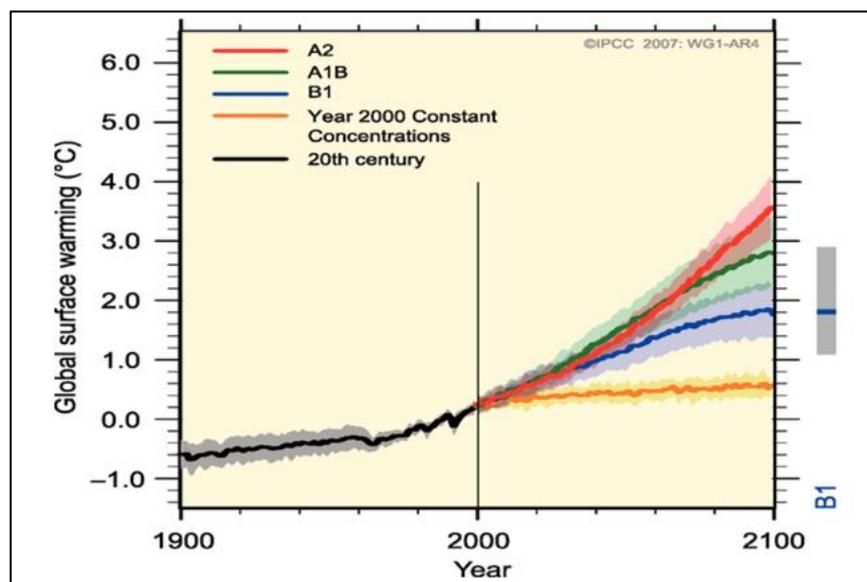


Figura 4 - Médias globais do aquecimento da superfície produzidas por vários modelos (relativas a 1980-99) para os cenários A2, A1B e B1.

Fonte: IPCC (2007).

4.2.1 Projeções climáticas regionalizadas para o Brasil com o AR4

Considerando as projeções de mudança de temperatura do ar para o Brasil ao longo da década de 2090 a 2099, derivadas da média de vários modelos de Circulação Geral da Atmosfera-Oceano (Figura 5), os resultados indicam que o aquecimento médio anual pode chegar até 2,5°C no cenário otimista (B1), até 4°C no cenário intermediário (A1B) e até 5°C em partes da região da Amazônia quando considerado o cenário mais pessimista (A2) (IPCC, 2007). Vale ressaltar que estas projeções apresentam menor grau de incerteza devido à grande consistência entre os modelos considerados. No entanto, as projeções da mudança no regime e distribuição de chuva não apresentam o mesmo grau de consistência (alta incerteza), pois dependem dos modelos e regiões consideradas (MARENGO, 2006).

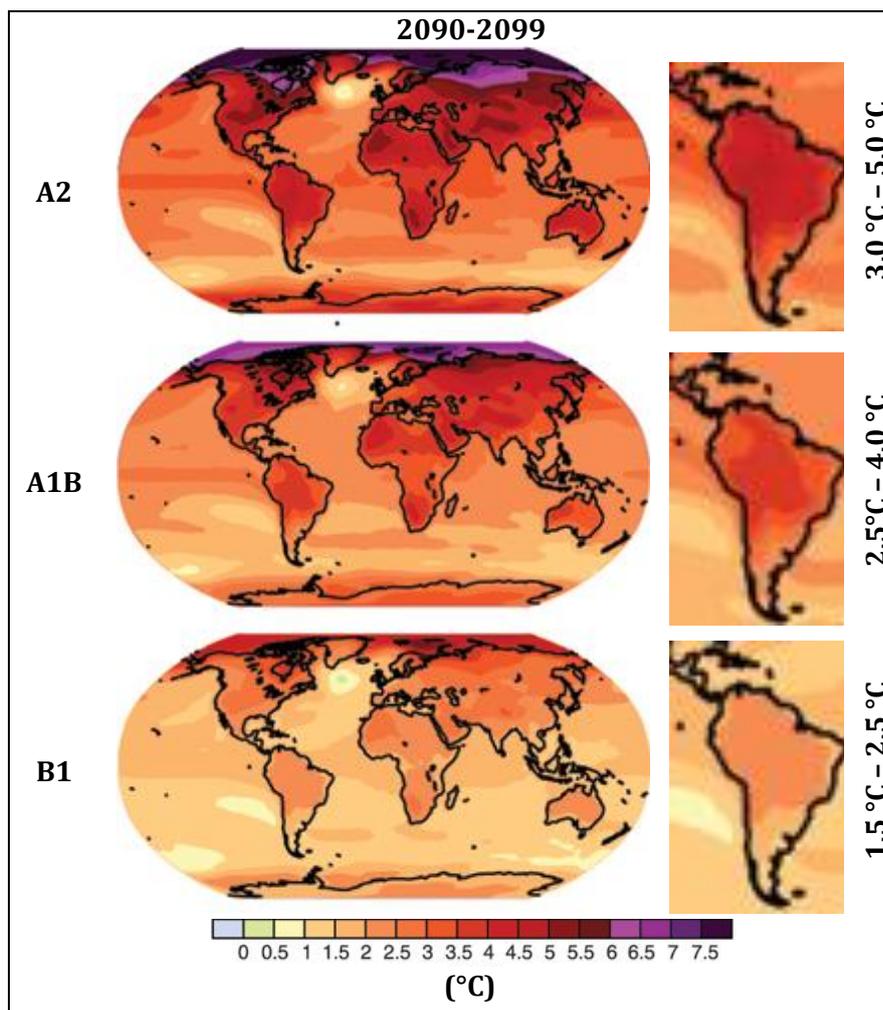


Figura 5 - Projeções das mudanças na média da temperatura da superfície para o final do século XXI, em relação ao período de 1980 a 1999. Para os cenários A2, A1B e B1.

Fonte: Adaptado de IPCC (2007).

Considerado a média de todos os modelos do IPCC-AR4 para o cenário A1B, as projeções indicam com maior probabilidade (áreas pontilhadas na Figura 6) diminuição da chuva na Amazônia oriental e Nordeste durante o período de inverno austral (Junho-Julho-Agosto (JJA)) e aumento de chuva na região Sul durante o período de verão austral (Dezembro-Janeiro-Fevereiro (DJF)). A redução das chuvas em JJA no Nordeste do Brasil poderia comprometer o regime de precipitação no leste da região, tendo em vista que os máximos valores associados à estação chuvosa ocorrem nessa

época do ano (MARENGO, 2010). Segundo Marengo (2010), as projeções de aumentos de chuva e vazão de até 20% nos meses de verão na bacia do Prata (localizada na parte Sul do Brasil) seguem a variabilidade observada nos últimos 50 anos, o que provavelmente forneça uma maior confiança nas projeções para essa região.

Na Figura 6 os valores são referentes à média de vários modelos, com base no cenário A1B para o período de dezembro a fevereiro e de junho a agosto, onde, as áreas brancas referem-se aos locais onde menos de 66% dos modelos concordam com o sinal da mudança e, as áreas pontilhadas são os locais onde mais de 90% dos modelos concordam com o sinal da mudança.

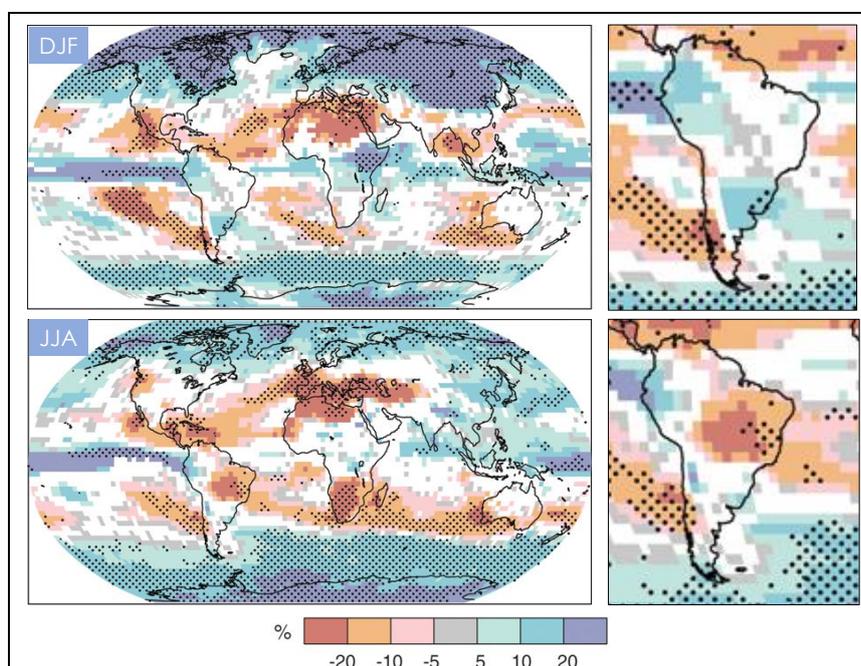


Figura 6 - Mudanças relativas da precipitação (%) para o período de 2090 a 2099, em relação ao período de 1980 a 1999, para o verão e inverno austral.

Fonte: Adaptado de IPCC (2007).

Projeções de mudanças climáticas do cenário A1B do AR4 foram regionalizadas para o Brasil através do modelo Eta forçado pelas condições iniciais e de contorno lateral do modelo HadCM3 (MARENGO et al., 2012). Foram considerados quatro membros do HadCM3 que correspondem aos membros de perturbação introduzidos nos esquemas de parametrização do modelo, com respostas de alta sensibilidade climática, média e

baixa, além do membro controle (membro não perturbado). O *downscaling* dinâmico (Eta-HadCM3) foi executado numa grade regular de 40 km x 40 km com domínio cobrindo toda América do Sul (CHOU et al., 2012; MARENGO et al., 2012). Em relação à temperatura do ar, as projeções do Eta-HadCM3 mostram resultados para a América do Sul tropical consistentes com os resultados da média dos modelos globais do IPCC AR4. A média dos quatro membros de perturbação indica um incremento na temperatura superior a 5°C em grande parte no Brasil até o final do século XXI, tanto no verão quanto no inverno (Figura 7).

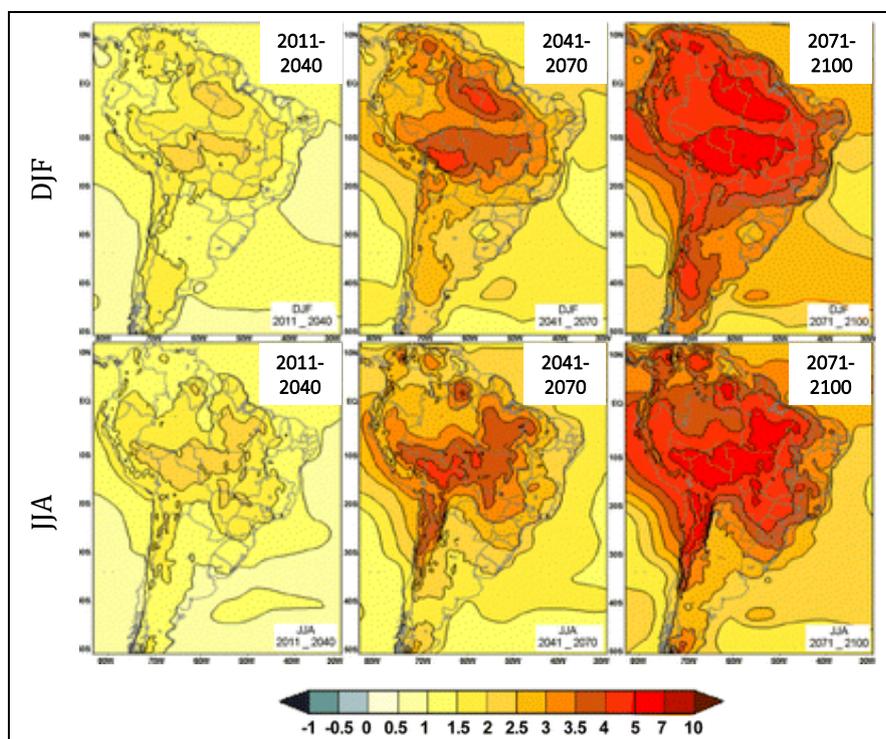


Figura 7 - Padrões projetados de mudanças na temperatura do ar (°C), em relação ao período de 1961 a 1990, para os períodos de verão e inverno austral.

Fonte: Adaptado de Marengo et al. (2012).

No primeiro período de tempo futuro (2011-2040) o aumento na temperatura é de aproximadamente 2°C na região amazônica passando a atingir 4°C em 2041-2070. Ao longo do século nota-se expansão dessa área de maior aquecimento (4°C), a qual se entende no último *timeslice* (2071-2100) até mais ao sul de 40°S, em ambas estações do ano analisadas.

Quanto à precipitação, as projeções do Eta-HadCM3 mostram consistência qualitativa em relação à média dos modelos globais do IPCC AR4, particularmente em relação ao aumento de chuva na região Sul do Brasil e diminuição na Amazônia e na região Nordeste (Figura 8 A-F).

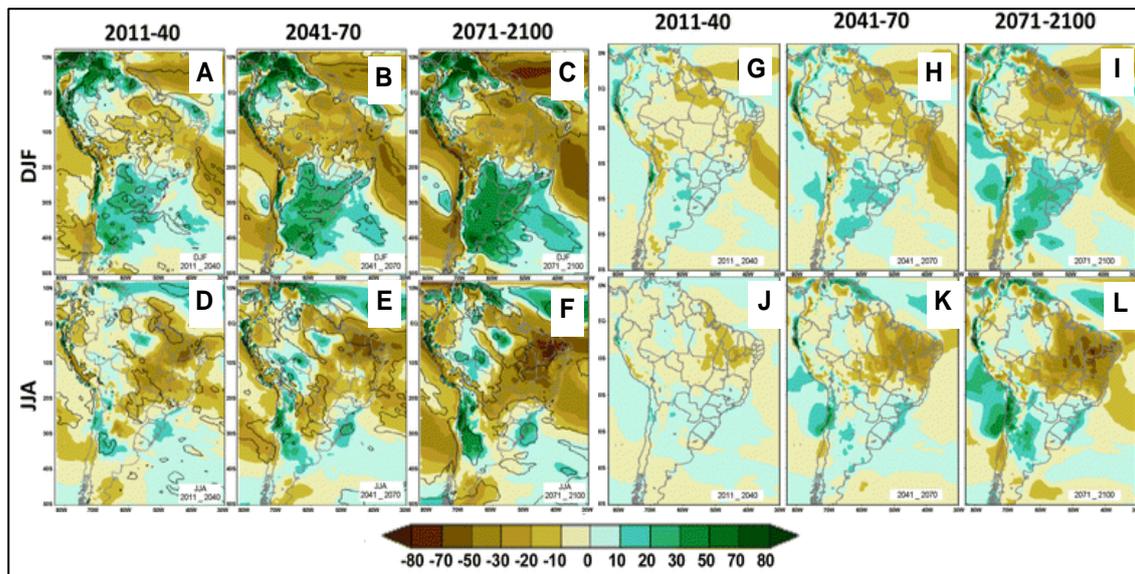


Figura 8 - Padrões projetados de mudanças na precipitação (% A-F) e precipitação menos evaporação - P-E (% G-L), em relação ao período de 1961 a 1990, para o verão e inverno austral.

Fonte: Adaptado de Marengo et al. (2012).

Em termos quantitativos, as reduções da precipitação na Amazônia e na região Nordeste são estimadas em cerca de 30%, ou seja, superiores aos valores médios oriundos dos modelos globais que é de aproximadamente 20% em DJF. Em relação às projeções das diferenças entre precipitação e evaporação, que representam uma aproximação ao balanço hídrico (disponibilidade hídrica), as maiores diferenças negativas P-E ($P < E$) são mostradas no leste da Amazônia e Nordeste do Brasil, particularmente sobre as bacias dos rios Amazonas e São Francisco (Figura 8 G-L). Nessas regiões, os valores mais negativos ocorrem no final do século em ambas as estações do ano, devido uma combinação de aumento significativo da temperatura do ar e redução da precipitação.

Um clima futuro mais quente e seco no semiárido do Nordeste do Brasil poderá tornar a região árida, o que resultaria em menos umidade do solo e menor escoamento o rio causando a degradação do solo e levando, potencialmente a desertificação (MARENGO et al., 2012). Marengo e Bernasconi (2015), através do uso das projeções do cenário A1B regionalizados pelo modelo Eta (de 40 km de resolução) aninhado ao global HadCM3, mostrou que de fato as áreas semiáridas do Nordeste brasileiro tenderão aumentar até 2100 e se tornar áridas numa área que se estende do norte da Bahia. Partes da Paraíba e Pernambuco ao centro-sul do Rio Grande do Norte (Figura 9). Tais prospectivas podem impactar diretamente a agricultura de subsistência do semiárido nordestino, obrigando as populações a migrarem, gerando ondas de “refugiados do clima” (ÁVILA, 2007).

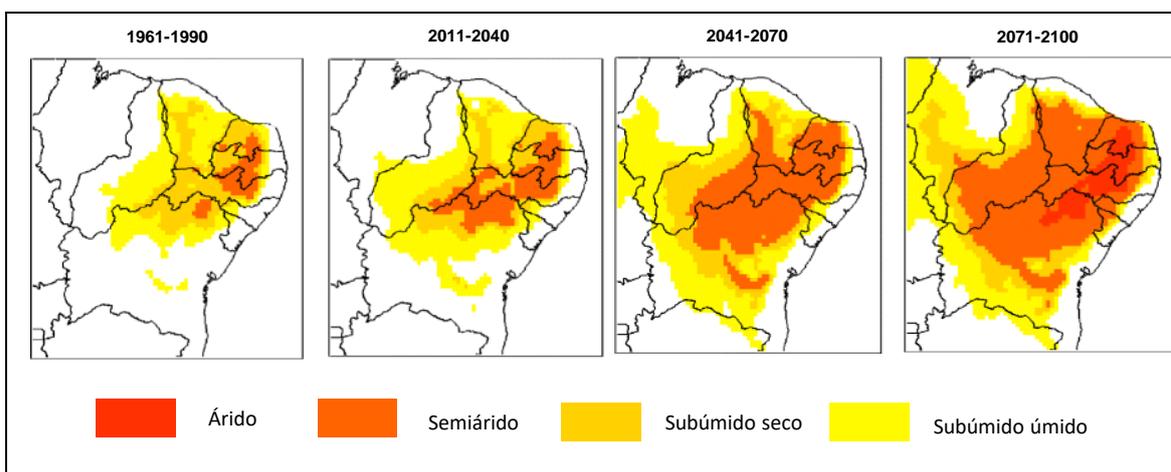


Figura 9 - Índice de aridez, calculado segundo a definição da UNEP (1992), para 1961-90, 2011-40, 2041-2070 e 2071-2100, para o cenário A1B.

Fonte: Adaptado de Marengo e Bernasconi (2015).

Tendo em vista que o valor da diferença entre a precipitação e a evaporação pode ser um indicador de escoamento superficial, análogo às vazões dos rios, tais resultados de P-E estão consistentes com os resultados de Milly et al. (2005). Estes autores avaliaram a vazão de diferentes rios ao redor do planeta utilizando as projeções do cenário A1B de doze modelos globais do AR4. Os resultados indicaram projeções de redução no final do século XXI (2080-2099) em relação ao escoamento do período de 1900-1970 de

aproximadamente de 15-20% na bacia do rio São Francisco e de 5-20% no rio Amazonas (parte oriental) (MILLY et al., 2005 apud MARENGO et al., 2012).

Em termos de precipitação e temperatura do ar, um resumo dos impactos regionais em três grandes bacias hidrográficas brasileiras, especificamente: bacias dos rios Amazonas, Paraná e São Francisco, é mostrado na Figura 10. Nessa figura, a tendência das mudanças na precipitação (%) é indicada por setas e, são mostrados os valores médios do aquecimento global, referente às projeções do modelo HadCM3, e o aquecimento regional em cada bacia e no Brasil, referentes as projeções do modelo Eta-HadCM3, assim como as concentrações de dióxido de carbono para o cenário A1B (MARENGO et al., 2012). Nota-se ao longo do século que a medida que o CO₂ aumenta as mudanças regionais tornam-se mais intensas. A médio (2041-2070) e a longo prazo (2071-2100), o incremento na temperatura global atinge 2,4°C e 3,4°C, respectivamente, enquanto que no Brasil o aumento corresponde a 3,2°C e 4,5°C. Em escala de bacia, o aquecimento é maior na bacia amazônica sendo a médio e a longo prazo de 3,5°C a aproximadamente 5°C, respectivamente. Em relação à precipitação, as simulações do Eta-HadCM3 projetam reduções anuais mais intensas no rio São Francisco sendo da ordem de 35% até 2100. Na bacia do rio Amazonas, as reduções anuais da chuva são de cerca de 9% (2011-2040), 15% (2041-2070) e 19% (2071-2100), enquanto que na bacia do rio Paraná as mudanças anuais são proporcionalmente pequenas (cerca de 2%), e de acordo com Marengo et al. (2012) dominadas por aumentos na temporada de março a maio, compensados por reduções na alta temporada de dezembro-fevereiro.

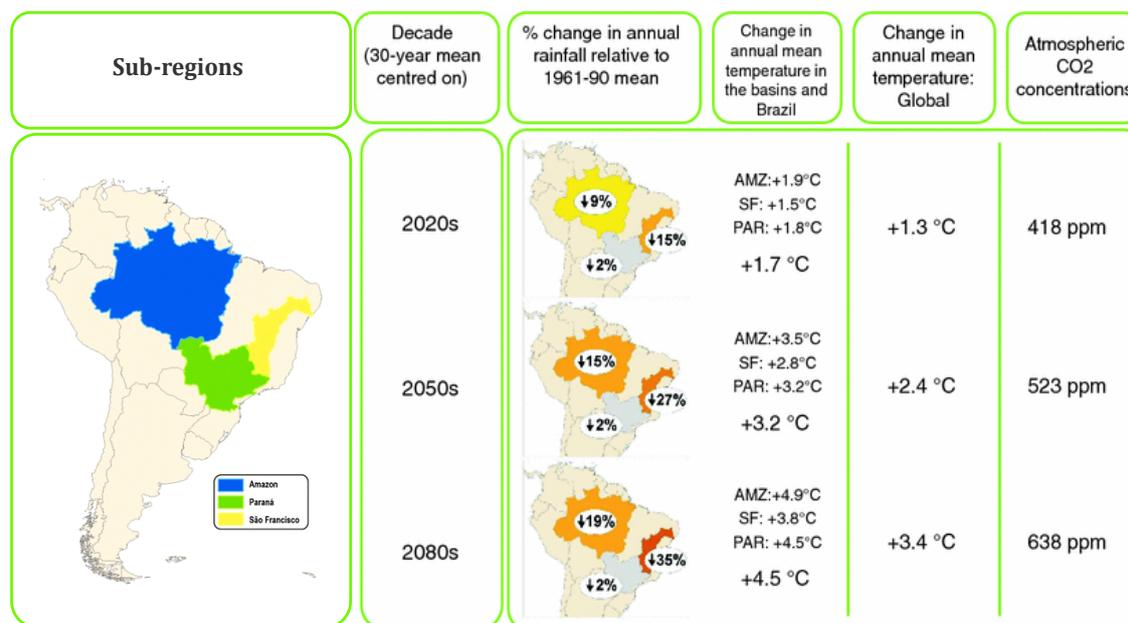


Figura 10 - Mudanças climáticas projetadas sobre o Brasil e as bacias dos rios Amazonas, São Francisco e Paraná para 2011–2040, 2041–2070 e 2071–2100 em relação a 1961–1990 associadas a diferentes níveis de aquecimento global e concentrações de dióxido de carbono.

Fonte: Adaptado de Marengo et al. (2012).

As projeções de temperatura e precipitação mostradas por Marengo et al. (2012), principalmente a longo prazo (2071-2100), concordam com os resultados de Marengo et al. (2009), Krüger et al. (2012), Reboita et al. (2014) e diversos trabalhos listados em Solman et al. (2013). Além do mais, segundo Marengo et al. (2012) e também mencionado em Reboita et al. (2014), a redução das chuvas nos cenários futuros sobre o Norte do Brasil pode estar associada ao enfraquecimento dos ventos alísios no oceano Atlântico tropical. Esses ventos transportam umidade do oceano para Amazônia, sendo bloqueados pela barreira topográfica dos Andes e consequentemente desviados para a região Sudeste do Brasil, contribuindo para aumento de umidade nesta região. O enfraquecimento dessa circulação implicaria, portanto, um menor transporte de umidade e consequentemente uma diminuição da precipitação (MARENGO et al., 2012; REBOITA et al., 2014).

Projeções de mudança na intensidade do vento são de grande importância estratégica para setores-chave, como é o caso da energia eólica, todavia seus estudos são escassos na literatura. Em termos globais, Eichelberger et al. (2008) avaliaram projeções da intensidade do vento próxima a superfície (10 m) oriundas de 14 membros dos modelos do IPCC AR4 dos cenários A1 e B2. Os autores mostraram as regiões no planeta em que maior parte dos modelos direcionam (em porcentagem) para aumento da velocidade do vento anual em 2050 (tons avermelhados na Figura 11). No Brasil, a maior porcentagem dos modelos direciona para aumento da intensidade do vento a superfície na região Sul e partes do Sudeste, Norte e Nordeste (EICHELBERGER et al., 2008).

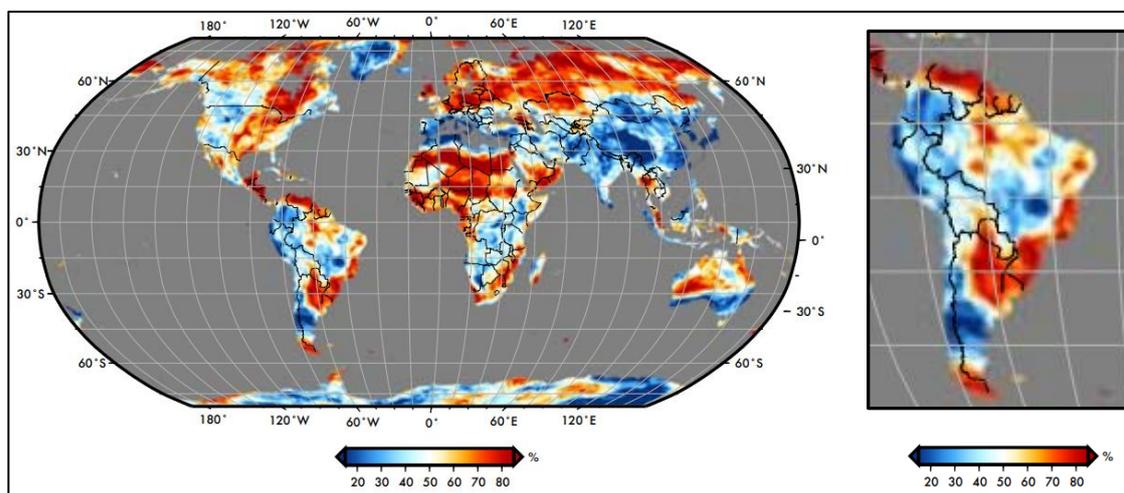


Figura 11 - Porcentagem de modelos climáticos globais do IPCC AR4 que mostram o aumento dos valores médios anuais da velocidade do vento a 10 metros em 2050, considerando o cenário A2.

Fonte: Adaptado de Eichelberger et al. (2008).

Devido à falta de estudos de projeções de vento com o Eta, aqui são apresentados os resultados de Lucena et al. (2010), o qual avaliou projeções da intensidade do vento próxima a superfície oriundas do modelo regional PRECIS (*Providing Regional Climates for Impact Studies*) na grade regular de 50 km x 50 km forçado pelo modelo global HadCM3. Foram realizadas projeções do clima para o final do século XXI (2071-2100), considerando os cenários de emissões do A2 e B2 do AR4. Os resultados mostraram

aumento de mais 20% nas velocidades médias anuais para região Norte, Nordeste e costa Leste para os dois cenários avaliados, com tendência de expansão para a região central do país em 2091-2100 (Figura 12). Nas áreas costeiras, as projeções climáticas mostram um número maior de ocorrências velocidades de vento acima de 8,5 m/s (Figura 13).

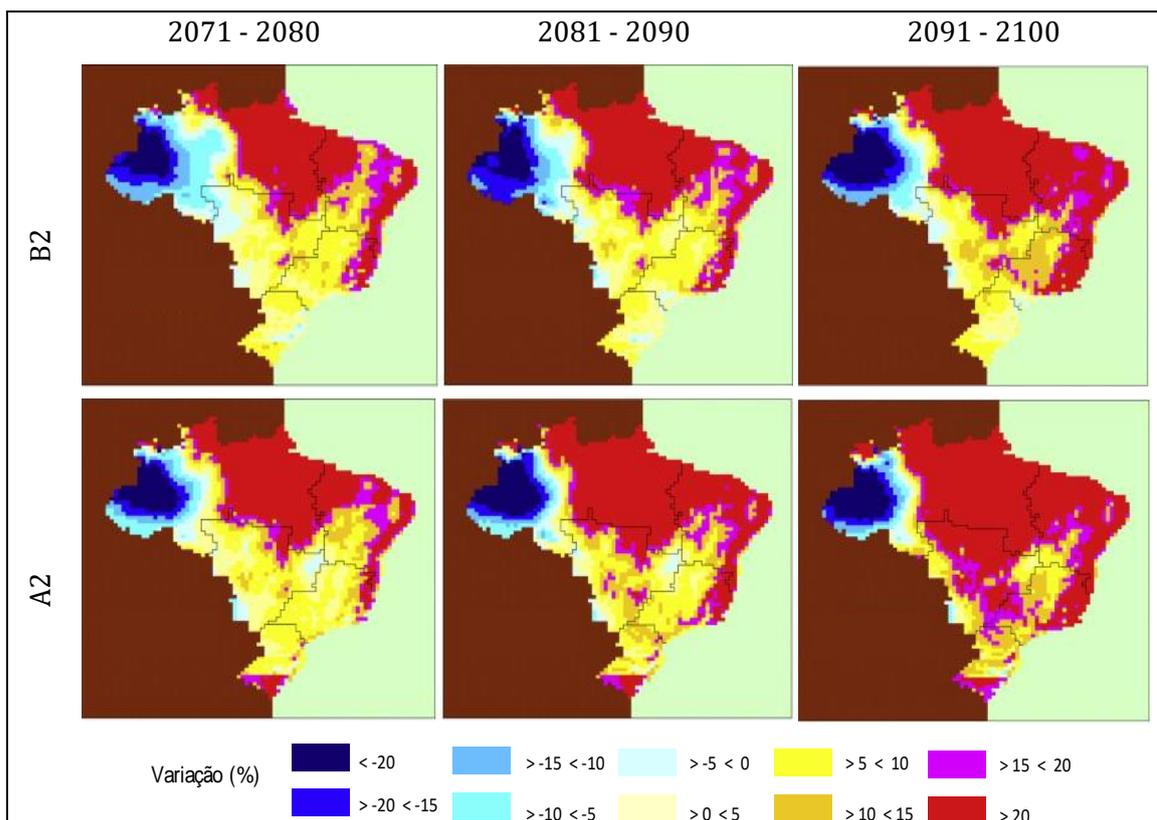


Figura 12 - Mudanças climáticas projetadas sobre o Brasil da variação da velocidade do vento (%) para 2071–2080, 2081–2090 e 2091–2100 em relação ao período baseline (1961–1990), considerando os cenários A2 e B2.

Fonte: Adaptado de Lucena et al. (2010).

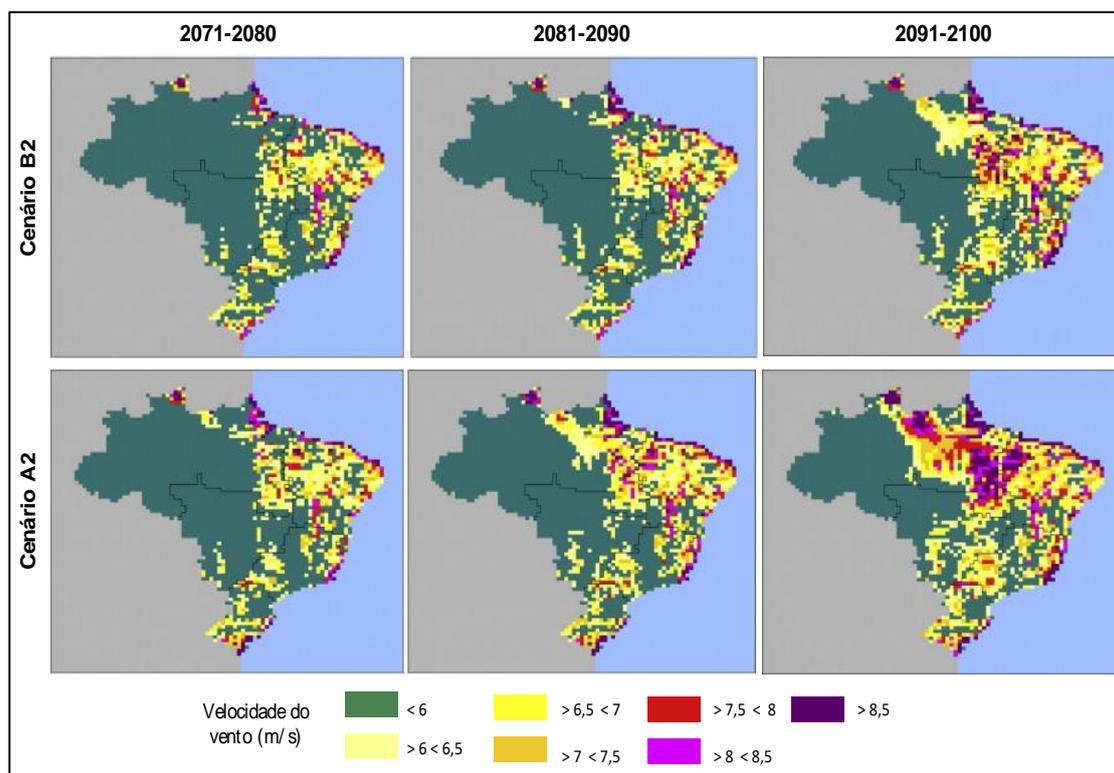


Figura 13 - Projeções da velocidade do vento (m/s) sobre o Brasil para 2071–2080, 2081–2090 e 2091–2100, considerando os cenários A2 e B2.

Fonte: Adaptado de Lucena et al. (2010).

Essas projeções climáticas também são abordadas no tópico 5, em que é apresentado um estudo do estado da arte referente a vulnerabilidade no setor de energia elétrica, com relação às mudanças climáticas. Apesar do IPCC ter lançado em 2014 o AR5, diversos trabalhos realizados para o setor elétrico brasileiro foram baseados no AR4, o que fez com que este relatório (AR4) também fosse abordado aqui. Alguns estudos estão sendo atualizados a partir da disponibilização das rodadas dos modelos do IPCC 2014, inclusive com o modelo regional Eta.

4.3 Projeções do quinto relatório do IPCC (AR5)

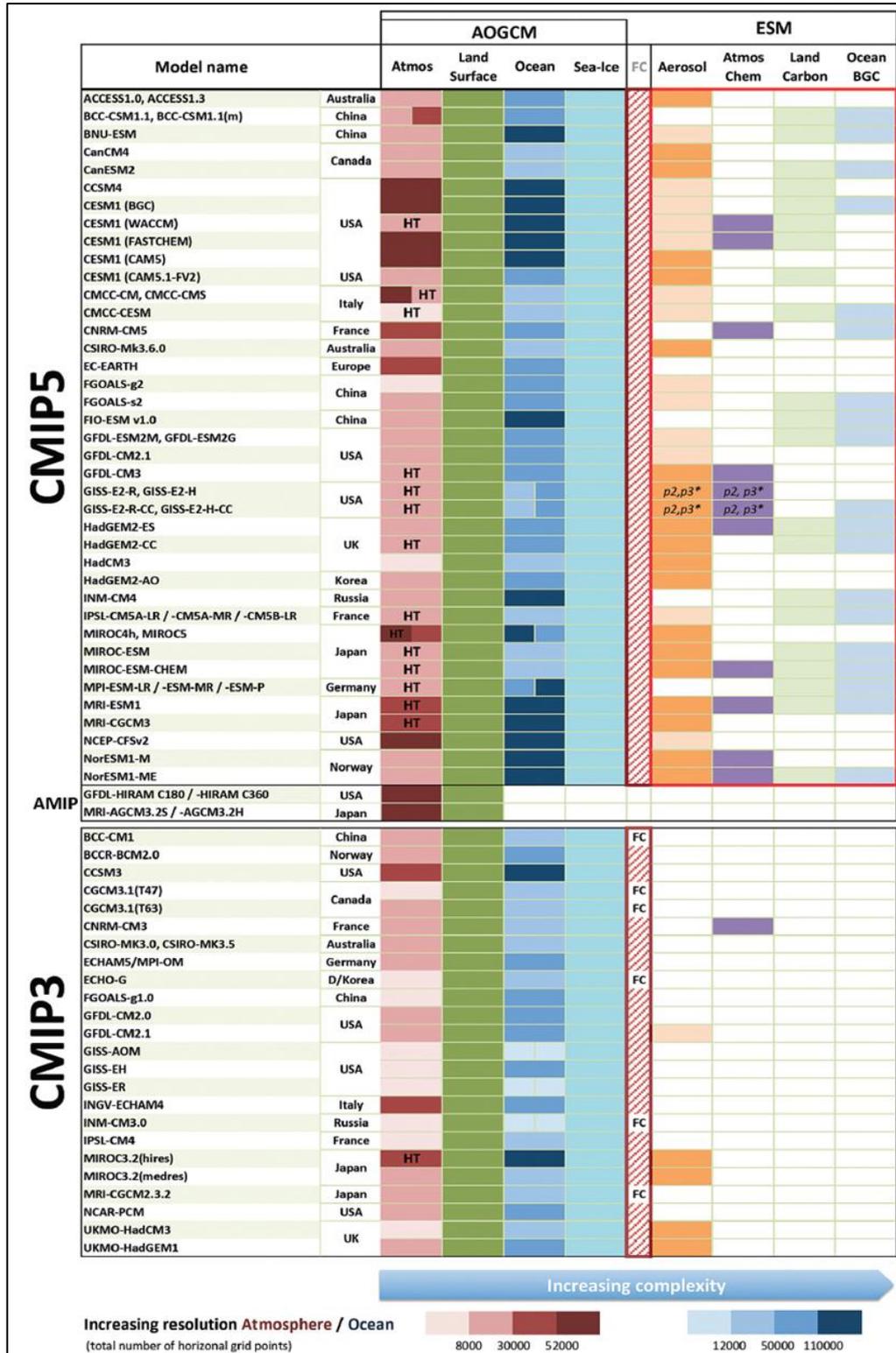
O quinto relatório de avaliação do IPCC (AR5- Fifth Assessment Report), lançado em 2014, é baseado nos caminhos representativos das concentrações dos GEE (RCPs) e suas forçantes radiativas no clima, como exposto anteriormente. A abordagem de

desenvolvimento dos cenários de emissão (SRES) foi alterada por limitações na obtenção de dados de Produto Interno Bruto (PIB), crescimento populacional, usos da terra, entre outros. Ademais, na abordagem anterior os processos não eram considerados de forma interligada. A abordagem atual dos cenários inicia com a evolução do nível de forçamento radiativo até 2100 com trajetórias que estão relacionadas a um espectro amplo de cenários de desenvolvimento socioeconômico, tecnológicos ou de emissões. As vantagens dos novos cenários é que representam um maior número de realizações de clima, com base na literatura, não sendo previsões ou resultantes de recomendações ligadas a políticas públicas. Além de que a inclusão de mais cenários de emissão possibilita considerar mais incertezas em relação às projeções do futuro.

O IPCC (2013) informa que desde o AR4 os modelos continuaram a ser desenvolvidos e aprimorados e, que muitos Modelos de Circulação Geral Atmosfera-Oceano (AOGCMs; sigla do inglês *Atmosphere–Ocean General Circulation Models*) foram aprimorados para Modelos do Sistema Terrestre (ESMs; sigla do inglês *Eart Model Sistem*), os quais incluem representações de ciclos bioquímicos, como emissões do ciclo de carbono, enxofre ou ozônio. Esses modelos conseguem simular respostas passadas e futuras do clima ao forçamento externo, no qual os *feedbacks* biogeoquímicos desempenham uma importante função. A Tabela 5 mostra as principais características dos AOGCMs e dos ESMs.

Tabela 5- Principais características dos AOGCMs e dos ESMs.

Fonte: IPCC (2013).



Outras mudanças no AR5 foram o aumento da complexidade e melhoria da resolução. Os modelos apresentaram também melhor desempenho na simulação do clima global do presente, com melhores simulações da precipitação, especialmente para as latitudes tropicais (CHOU et al., 2014a) e, da temperatura da superfície. As correlações espaciais destas variáveis no AR5 passaram a ser de 0,82 (precipitação) e 0,99 (temperatura), embora erros sistemáticos de vários graus ainda sejam encontrados em algumas regiões, principalmente topografia elevada perto da borda do gelo no Atlântico Norte e em regiões de ressurgência do oceano próximo ao equador (IPCC, 2013). Entretanto, o IPCC (2013) realça que a avaliação da precipitação ainda continua difícil devido às incertezas observacionais e que, em escalas regionais, a confiança na capacidade do modelo de simular a temperatura da superfície é menor do que em escalas maiores. Apesar disso, os vieses regionais são em média quase zero para a temperatura da superfície.

Resultados das simulações de nuvens também apresentaram melhoras. Entretanto, ainda há grandes incertezas, tanto para precipitação quanto para nuvens, principalmente em escalas regionais. Segundo o IPCC (2013), estas incertezas advêm de dúvidas com relação a incertezas observacionais e, há fortes indícios de que as incertezas em processos de nuvens, também explicam muito da propagação da sensibilidade climática modelada.

Outras melhorias com relação ao AR4 são observadas nas simulações de trajetórias de tempestades, aquecimento e absorção de calor dos oceanos e, ciclo sazonal da extensão do gelo marinho. Porém existem tendências de modelos subestimarem a extensão do gelo marinho ártico (IPCC, 2013).

Sobre eventos extremos, o IPCC (2013) informa que de acordo com a avaliação de um conjunto de índices, os inter-modelos (conjunto de modelos), em geral, apresentam simulações semelhantes às estimativas observacionais em grande parte das regiões. Estes resultados comprovam um considerável avanço dos modelos de simulações de eventos extremos desde o AR4. Simulações representam satisfatoriamente o aumento de extremos de frio e calor a partir da segunda metade do século XX, porém a maioria

dos modelos subestima os valores de precipitação extrema. Melhorias em relação ao AR4, também foram observadas nas simulações do ozônio estratosférico.

No AR5, a chance de que o homem tenha causado mais da metade do aumento da temperatura média global registrada entre 1951 e 2010 passou de 90% (*muito provável*, divulgado no AR4) para 95% (*extremamente provável*). Quanto às projeções climáticas, as simulações indicam um aumento na temperatura média global de 0,3°C a 1,7°C de 2010 a 2100, para o cenário mais otimista (RCP2.6) e de 2,6°C a 4,8 °C, para o cenário mais pessimista (RCP8.5) (IPCC, 2013).

4.3.1 Projeções climáticas regionalizadas para o Brasil com o AR5

No Brasil, tomando as médias dos modelos globais do CMIP5, as projeções mostram um aumento de temperatura para a Amazônia variando de 0,6°C a 2°C (RCP2.6) e de 3,6°C a 5,2°C (RCP8.5) (Figura 14). Na região Nordeste, os aumentos de temperatura variam de 0,6°C a 2°C (RCP2.6) podendo chegar a 7°C (RCP8.5) no final do século XXI. Já para a precipitação, no caso do cenário RCP2.6, as mudanças mostradas para meados e final do século são pequenas. No cenário RCP8.5 são mostradas mudanças com maior grau de concordância na região sul do Brasil, com aumentos da precipitação da ordem de 15 a 20% (MAGRIN et al., 2014).

Vale ressaltar, que na Figura 14 cores sólidas indicam áreas com concordância muito forte, cores com pontos brancos indicam áreas com forte concordância, o cinza indica áreas com alterações divergentes e as cores com linhas diagonais indicam áreas com pouca ou nenhuma alteração.

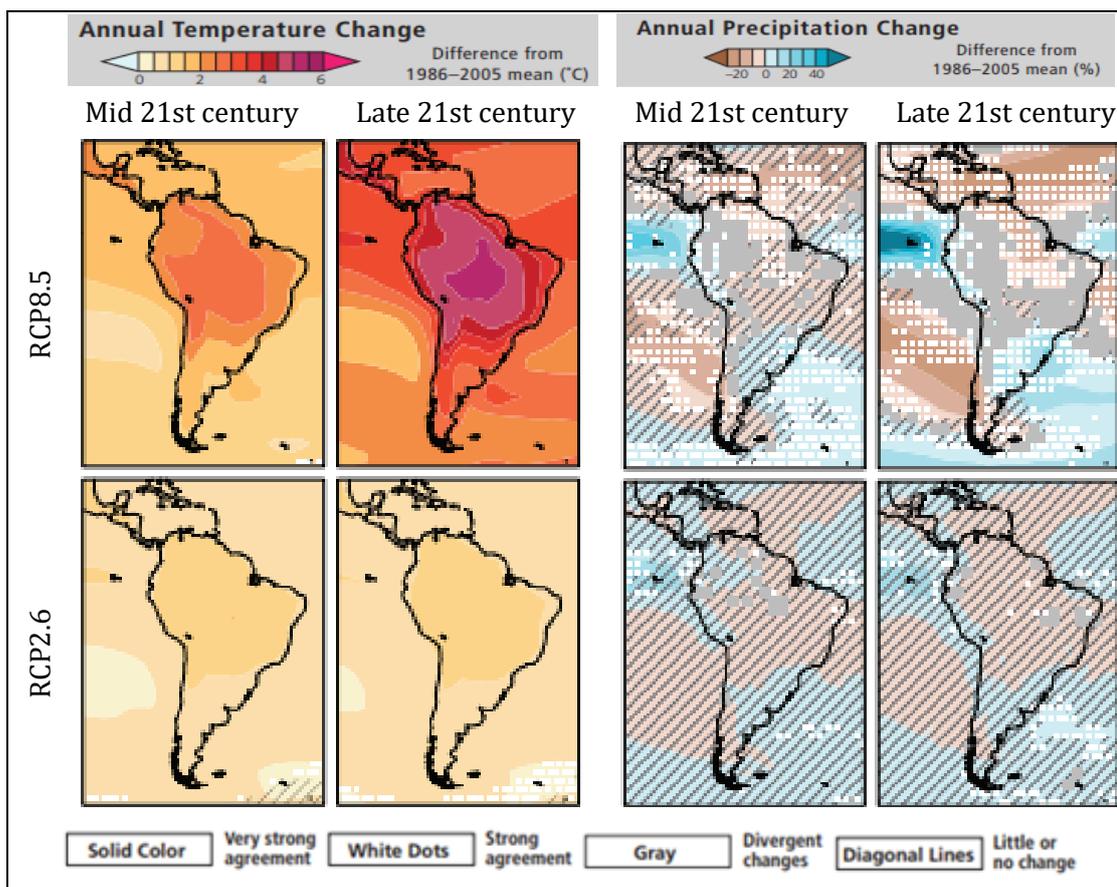


Figura 14 - Mudanças projetadas na temperatura média anual (°C) e precipitação (%) em relação ao período de 1986– 2005, para os cenários RCP2.6 e RCP8.5.

Fonte: Adaptado de Magrin et al. (2014).

Projeções climáticas regionalizadas para o Brasil são apresentadas por Chou et al. (2014a) com base nas simulações do modelo Eta aninhado as saídas dos modelos globais HadGEM2-ES e MIROC5, considerando os cenários RCP4.5 e RCP8.5. Campos compostos das faixas superior e inferior das mudanças de temperatura do ar (°C) entre as quatro projeções mostrados pelos os autores indicam que a região central e a sul do Brasil são as mais sensíveis às mudanças climáticas, onde ocorre o maior aquecimento (Figura 15). Nestas regiões o aquecimento até 2100 podem atingir valor superior a 3°C podendo chegar a 9°C, no limite superior da mudança. Ao longo do século, à medida que o CO₂ equivalente aumenta, esta área de maior aquecimento expande-se e atinge áreas tropicais, como região Norte do país, ocupando a grande parte do continente Sul-americano e Central.

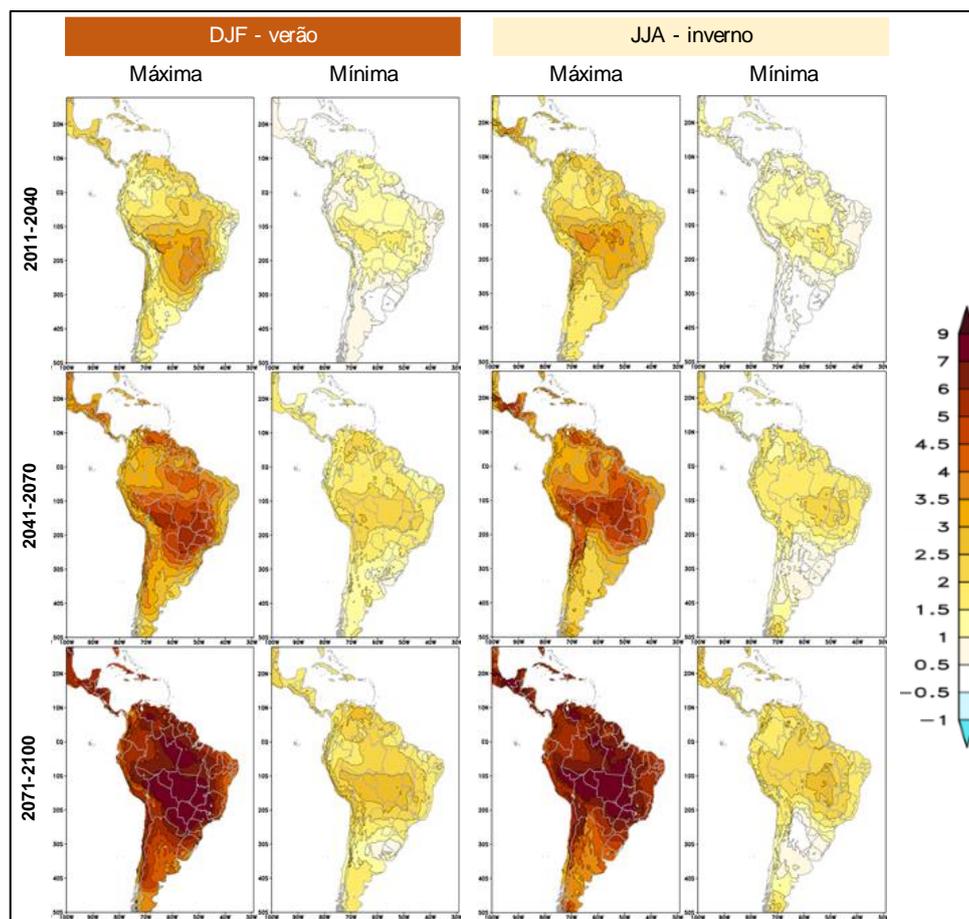


Figura 15 - Campos compostos do intervalo inferior e superior das mudanças projetadas da temperatura do ar (°C) em relação ao período de 1961 a 1990, extraídos de 4 membros do Eta, para os cenários RCP4.5 e RCP8.5.

Fonte: Adaptado de Chou et al. (2014a).

De acordo com a Figura 15, no período do inverno (junho a agosto), as mudanças de temperatura são similares, mas ligeiramente maiores que no período verão (dezembro a janeiro). Diferenças de mudanças entre as duas estações podem ser notadas apenas no norte da Argentina e no Paraguai. No inverno a área de menor aquecimento é pouco maior que no verão. Chou et al. (2014a) também apresenta em seus resultados, a Figura 16, mostrando um aquecimento da atmosfera com o passar dos anos e que as projeções Eta-HadGEM2-ES apresentam temperaturas mais elevadas em relação ao Eta-MIROC5 em todos os períodos. Este resultado concorda com os obtidos por Magrin et al. (2014) e Chou et al. (2014b).

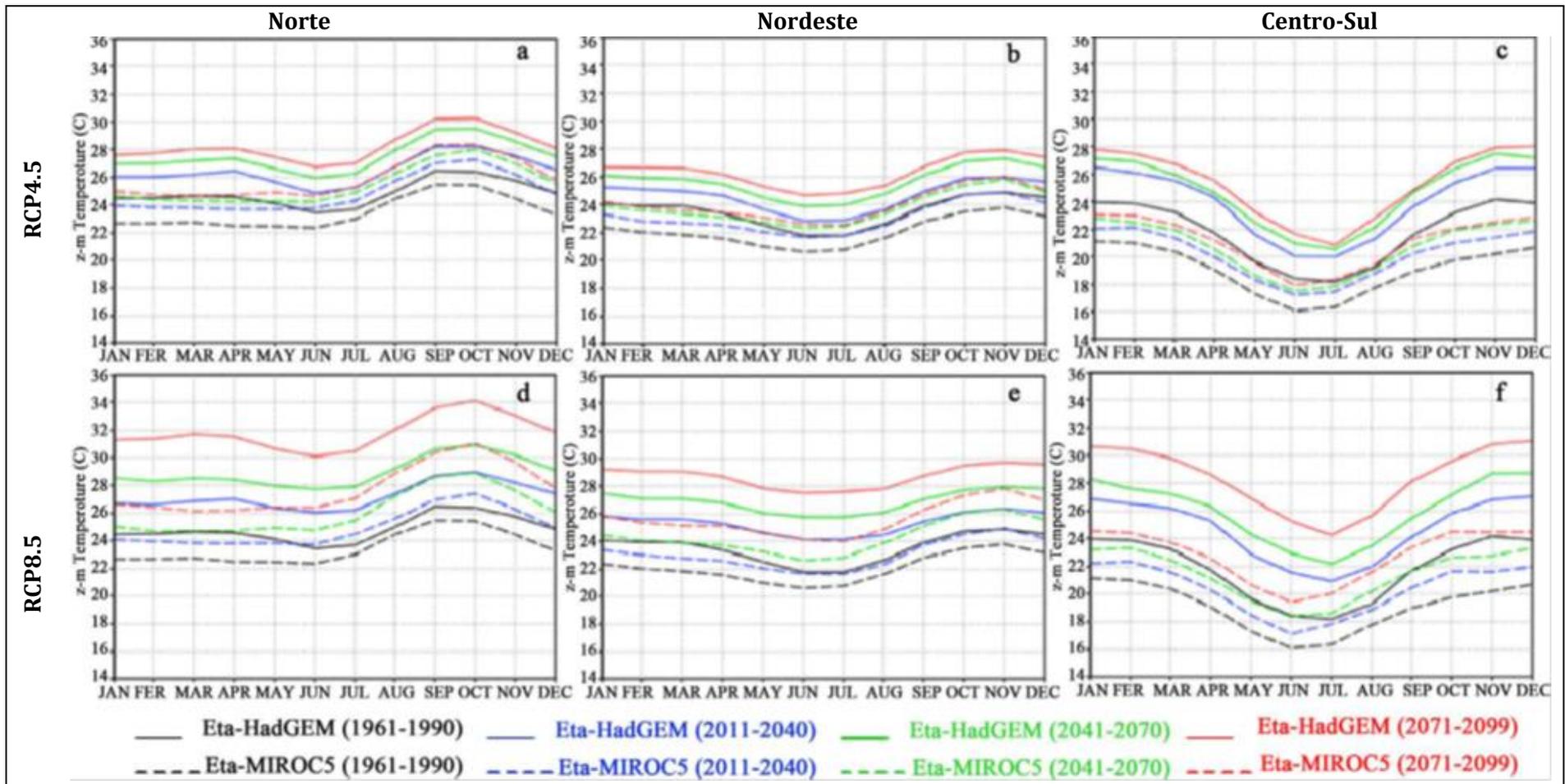


Figura 16 - Temperaturas médias anuais em 03 regiões brasileiras: modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 e cenários RCP4.5 e RCP8.5.

Fonte: Chou et al. (2014a).

Analogamente à temperatura do ar, Chou et al. (2014b) apresentou campos compostos das faixas superior e inferior das mudanças da precipitação (mm/dia) (Figura 17). Nota-se que nos meses de verão austral, as projeções indicam redução da precipitação em uma grande área que se estende desde o Norte até a região Sudeste-Sul do Brasil, aonde a redução na maior parte desta área é de 2 mm/dia, entretanto, pode chegar a até 9 mm/dia em algumas localidades. Essa área é geralmente caracterizada pela presença da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), considerado o principal sistema meteorológico que acumula grandes quantidades de chuva no período de verão. A partir destas tendências, os autores sugerem que tais reduções podem ser ocasionadas pela diminuição da ocorrência ou da atividade da ZCAS na produção de precipitação na região. As áreas de maior redução expandem-se mais para o sul do Brasil e se intensificam ao longo do século. No norte do Nordeste, as mudanças na faixa superior indicam aumento de precipitação nos meses de verão austral a curto (2011-2040), médio (2041-2070) e a longo prazo (2071-2100). No inverno, ocorre redução da precipitação no norte do Brasil, o que está associada a deslocamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) para latitudes mais ao norte. A ZCIT é o principal sistema causador de chuvas no Norte e Nordeste do Brasil (MARENGO et al., 2011a). Na região Sul do Brasil, em geral, são notados aumentos da precipitação em ambas as estações do ano analisadas, que chegam ao acréscimo de até 3 mm/dia no verão e de até 1 mm/dia no inverno em grande parte desta região para o período de 2011-2040, de até 2 mm/dia no verão e no inverno para o período de 2041-2070 e, de até 2 mm/dia no verão e de até 3 mm/dia no inverno para o período de 2071-2100.

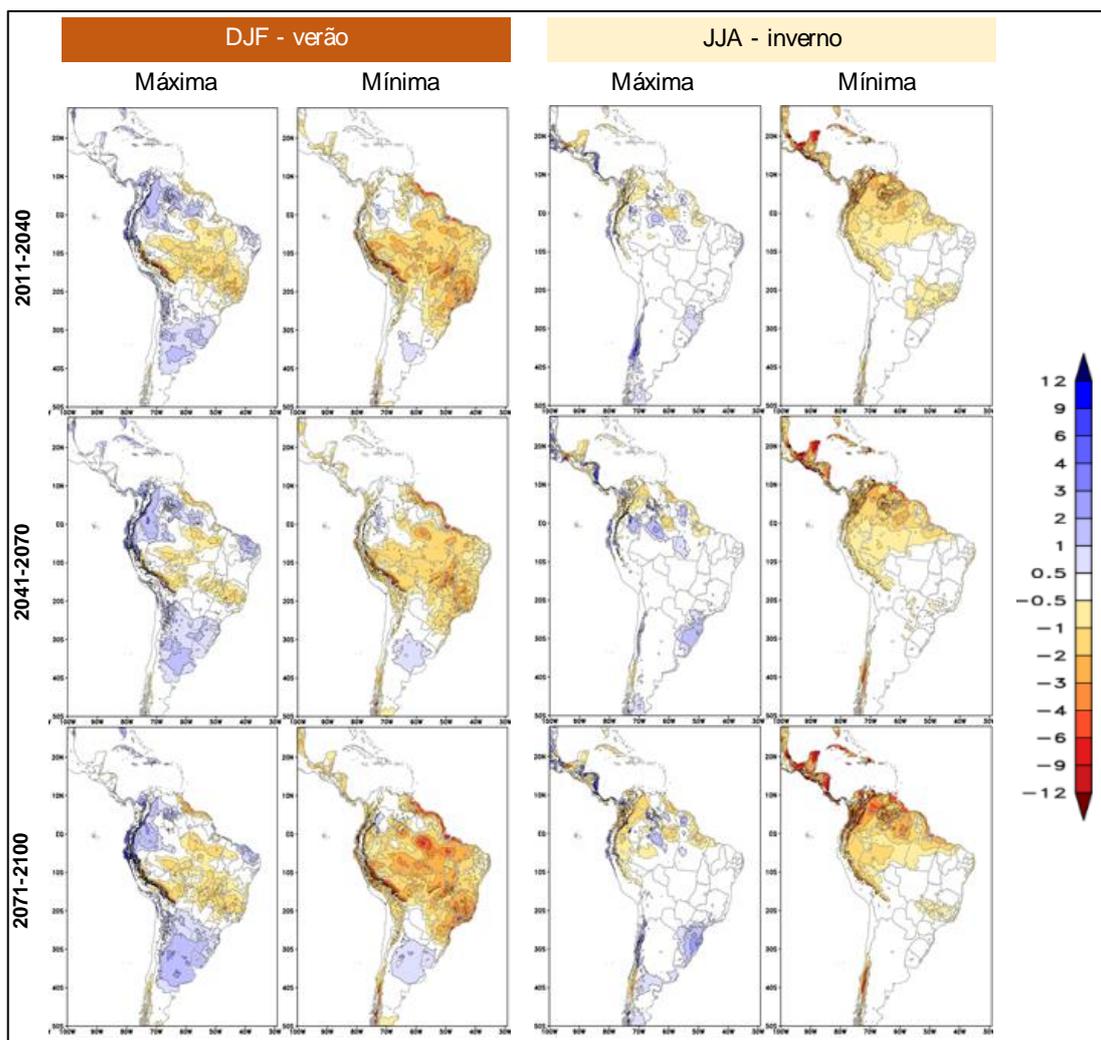


Figura 17 - Campos compostos dos intervalos inferior (mínima) e superior (máxima) das mudanças projetadas da precipitação (mm/dia) em relação ao período *baseline* (1961-1990), extraídos de 4 membros: Eta-HadGEM2-ES RCP4.5 e RCP8.5, Eta-MIROC5 RCP4.5 e RCP8.5.

Fonte: Adaptado de Chou et al. (2014b).

As projeções das mudanças da temperatura do ar (Figura 15) e precipitação (Figura 17) sobre o Brasil apresentadas por Chou et al. (2014b) estão consistentes com os resultados apresentados por Marengo et al. (2012) gerados a partir dos cenários SRES e diversos outros listados em Solman et al. (2013). A região sul do Brasil é a que apresenta maior concordância entre as projeções, com aumento da precipitação principalmente no período de verão austral. Na região centro-sul do Brasil, em uma

faixa orientada de noroeste-sudeste, os resultados convergem para diminuição da precipitação nos meses de verão, período da atuação da ZCAS (CHOU et al., 2014; MARENGO et al., 2012). No norte do Nordeste do Brasil, nesta mesma estação, são projetados aumentos das chuvas (CHOU et al., 2014; MARENGO et al., 2012). Redução da precipitação no Brasil central-Sudeste pode impactar diretamente a produção de energia elétrica da fonte hídrica. A partir de simulações regionalizadas do modelo Eta com cenários SRES (MARENGO et al., 2012), simulações estas utilizadas no projeto P&D 10 ANEEL, projeta-se uma perda de quase 25 % na energia assegurada ou garantia física do sistema em 2050 (LIMA et al., 2014). Com intuito de atualizar ou ratificar estas prospectivas, na seção 5.1 é feita uma nova análise dos impactos das mudanças climáticas na geração de energia elétrica hidráulica, a partir das novas projeções regionalizadas do modelo Eta (CHOU et al., 2014b) considerando os cenários RCPs.

Em relação à intensidade do vento, com base nas simulações do modelo Eta-HadGEM2-ES do cenário RCP8.5, as projeções indicam aumento da velocidade do vento a 100 m em grande parte do Brasil em praticamente todas as estações do ano (Figura 18). Os aumentos são mais significativos nos últimos 30 anos do século XXI nas estações de primavera e verão. Resultados similares foram encontrados por Reboita et al. (2018), a partir das simulações do modelo RegCM4 aninhadas aos modelos globais MPI-ESM-MR, GFDL-ESM2M e HadGEM2-ES, considerando o cenário RCP8.5 (Figura 19).

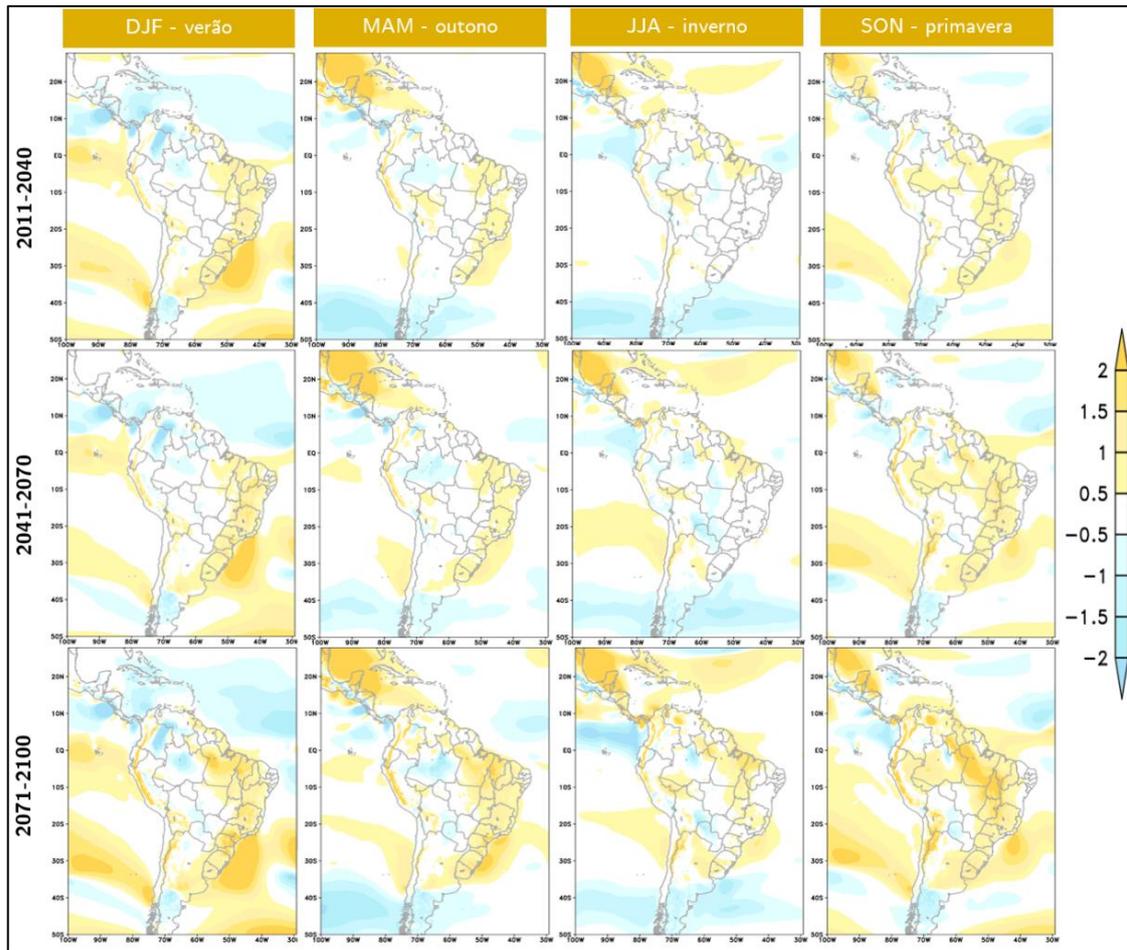


Figura 18 - Mudanças projetadas da velocidade do vento a 100 m (m/s) com base nas simulações do modelo Eta-HadGEM2-ES RCP8.5 para os meses de verão (DJF), outono (MAM), inverno (JJA) e primavera austral (SON).

Fonte: Campos cedidos pelo pesquisador Dr. André Lyra do grupo do Modelo Regional Eta.

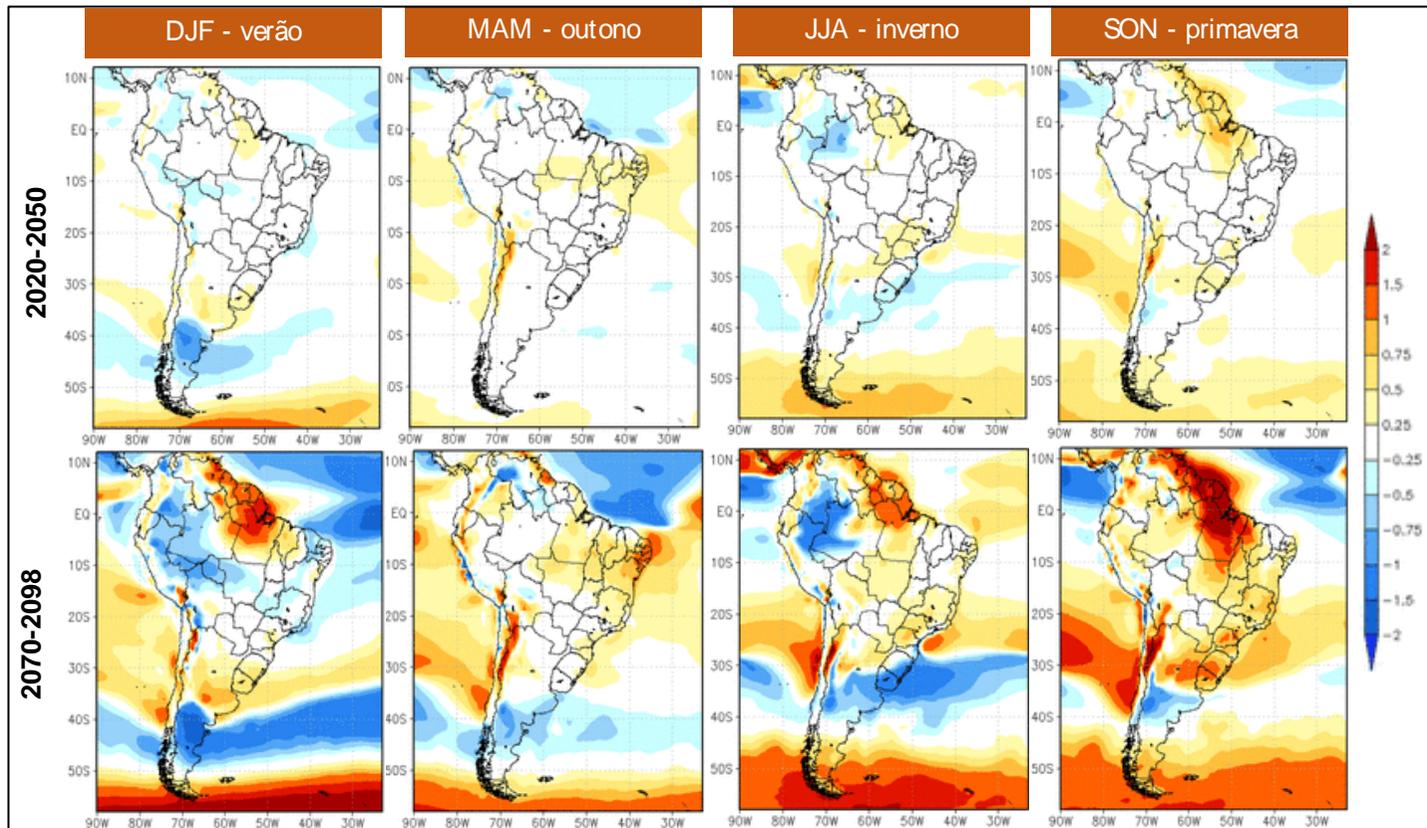


Figura 19 - Mudanças projetadas da velocidade do vento a 100 m (m/s) com base nas simulações do modelo RegCM4 aninhado as saídas dos modelos globais MPI-ESM-MR, GFDL-ESM2M e HadGEM2-ES, considerando o cenário RCP8.5. Simulações para os meses de verão (DJF), outono (MAM), inverno (JJA) e primavera austral (SON).

Fonte: Adaptado de Reboita et al. (2018).

No tópico 5, essas projeções climáticas são abordadas dentro de um levantamento do estado da arte referente à vulnerabilidade no setor de energia elétrica, com relação às mudanças climáticas.

4.4 Análises de eventos extremos

Segundo Marengo (2014), as projeções até 2100 indicam um aumento de extremos de calor, bem como a diminuição de extremos de frio para todo o Brasil. As projeções também mostram o aumento dos extremos de precipitação para a região Sul e Sudeste do Brasil e Oeste da Amazônia, podendo estar associados a outros extremos climáticos como enchentes, inundações e deslizamentos. O estudo também indica o aumento da intensidade de dias secos consecutivos no leste da Amazônia e Nordeste brasileiro. Estes eventos em geral podem ser vistos na Figura 20.

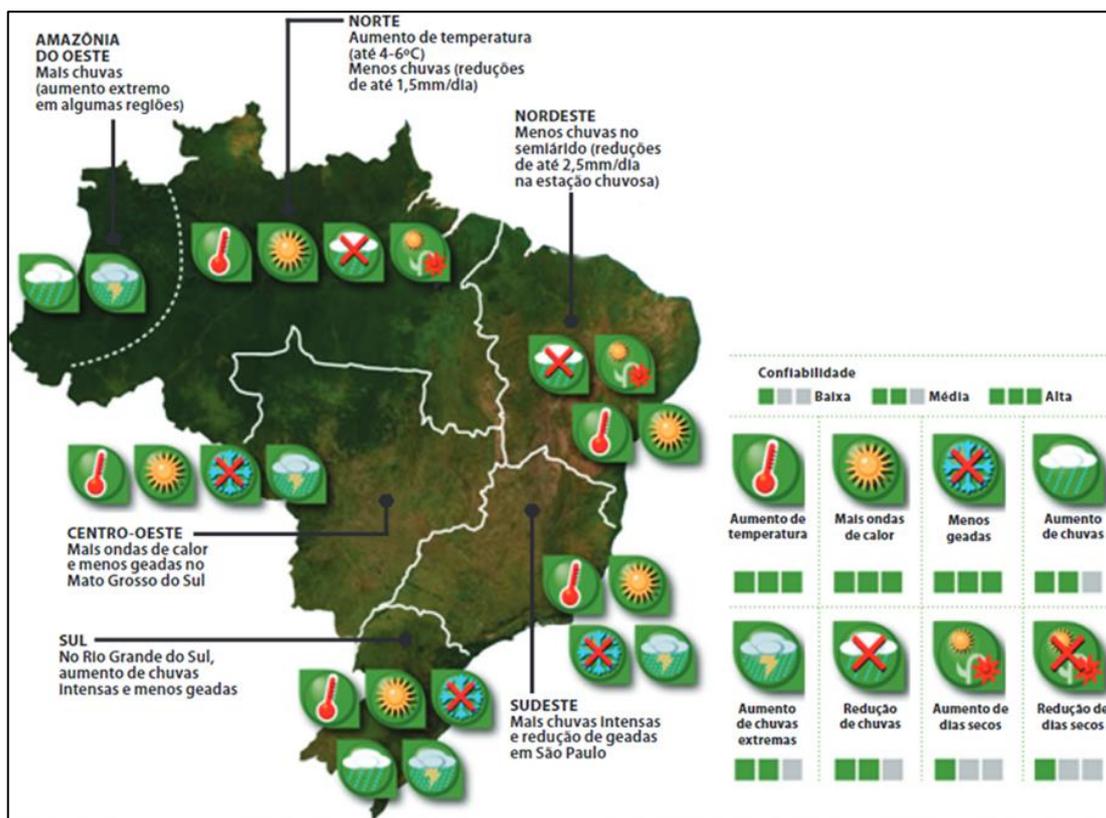


Figura 20 - Projeções do clima por região no ano, indicando mudanças projetadas e níveis de confiança.

Fonte: Inpe, Margulis e Debeux (2010 apud MARENGO, 2014).

Resultados extremos para descarga (condições mínimas e máximas) foram avaliadas por Neto et al. (2016), usando uma curva de permanência para cada célula do modelo (Figura 21). As condições máximas de descarga são representadas por Q10 (valores de descarga com frequência menor que 10%) e as descargas de menor intensidade são representadas por Q95 (valores de descarga com frequência maior que 95%). Porções na região Norte, Sul e Sudoeste e pequena área ao longo da costa Nordeste apresentam intensificação de descargas extremas, em que as diferenças de Q10 são positivas, mais evidentes no início de século 21. Para o restante do país, o parâmetro Q10 apresenta valores negativos, o que se intensifica no final do século. As diferenças para Q95, que representam as descargas mínimas, mostram diferenças neutras ou ligeiramente negativas para a maioria do território, tonando-se mais negativas no final do século. Por outro lado, seguindo as tendências de aumento de precipitação verificadas em Chou et al. (2014), a cabeceira da bacia do Uruguai, porção da região Nordeste e pequena área da Amazônia Oriental apresentaram aumento das descargas mínimas, o que é revertido no período de 2071 – 2099.

Os resultados de Neto et al. (2016) são condizentes com as análises realizadas no projeto de P&D 10 da ANEEL 2008 (LIMA et al., 2014). Os autores utilizaram projeções climáticas de 10 modelos climáticos para simulação hidrológica de vazões das principais usinas hidrelétricas do Brasil, a partir do modelo hidrológico MGB-IPH. Para a região Sul e para a porção Sul da bacia do rio Paraná, a maioria dos modelos sugeriu aumento das vazões. Por outro lado, na porção sul da Amazônia, que inclui os rios Madeira, Tapajós, Xingu e Tocantins, a tendência apontada foi a redução das vazões.

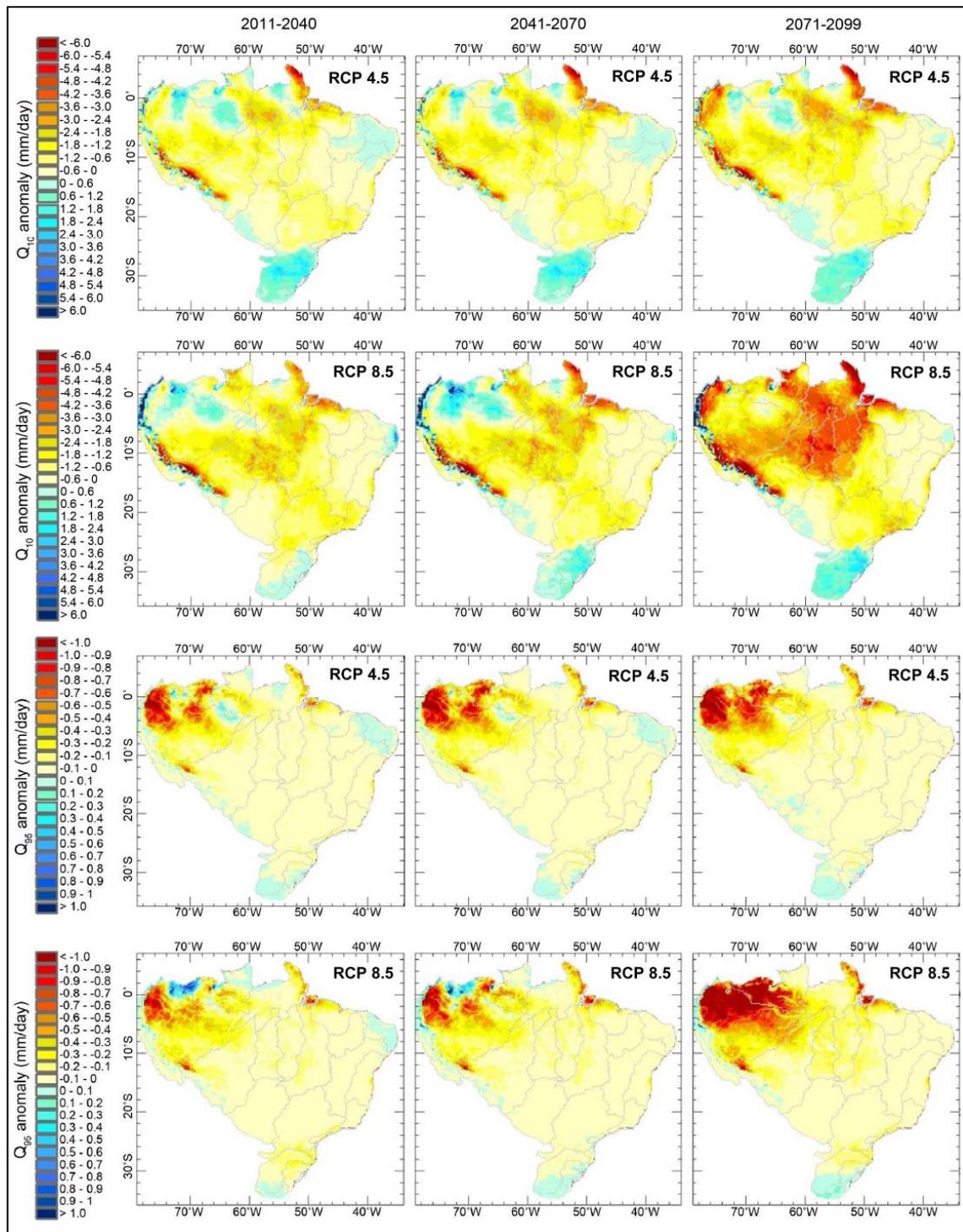


Figura 21 - Diferenças dos resultados de descarga mínima e máxima (Q10 e Q95) entre os cenários RCPs de projeção climática (Eta-HadGEM2-ES) e o período presente (1961-1990).

Fonte: Neto et al. (2016).

Alterações mais significativas no comportamento do vento devem-se à influência de sistemas circulatórios de grande escala. Segundo Gastineau e Soden (2011), tanto observações quanto simulações de modelos apontam para uma redução de extremos de ventos em resposta ao aquecimento dos oceanos tropicais. Os resultados de Pes (2015) também sugerem esta redução, a qual pode ser vista na Figura 22. Essas diminuições tornam-se ainda mais visíveis em anos de El Niño e sistemas como a ZCIT também podem influenciar na ocorrência de extremos, como no caso do Nordeste brasileiro (OLIVEIRA; COSTA, 2011).

De acordo com a Figura 22 haverá uma tendência negativa dos máximos de vento ao longo da costa brasileira e uma tendência positiva de ventos mínimos durante o século XXI. Tendências positivas de vento máximo de vento concentram-se dentro do continente, em especial nas regiões Norte, Sul e Sudeste do Brasil.

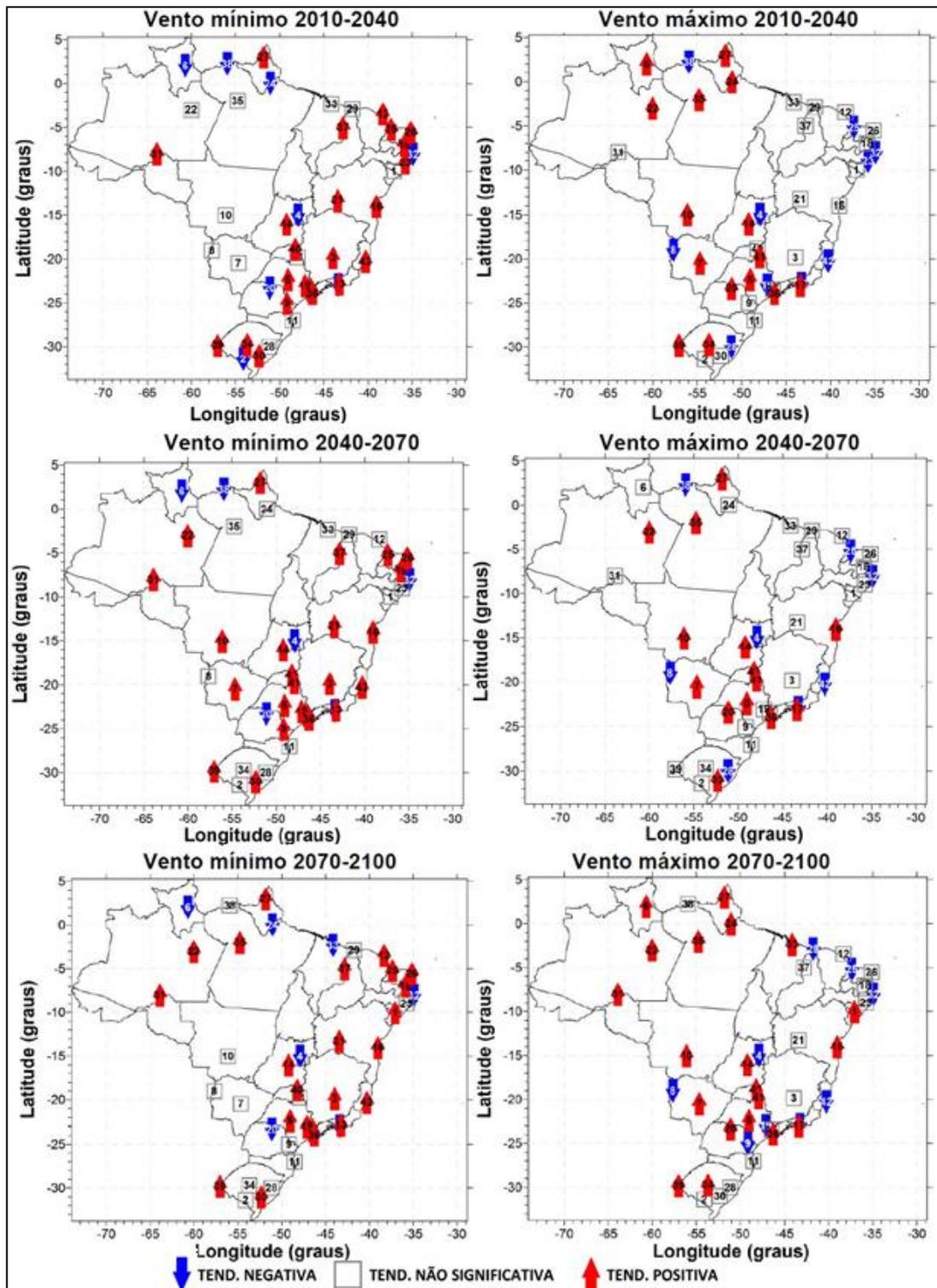


Figura 22 - Análise de tendência climática nas séries de velocidade mínima e máxima do vento RNA10m para o período de (a) 2010-2040; (b) 2040-2070 e (c) 2070-2100.

Fonte: Pes (2015).

4.5 Projeções para a bacia do rio São Francisco

A bacia do rio São Francisco é a terceira maior do Brasil e uma das mais importantes do país, abrangendo uma área de 638.466 km² (7,5% do território nacional, englobando 503 municípios), que compreende sete estados brasileiros: Bahia, Minas Gerais, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Goiás e Distrito Federal. O rio São Francisco percorre uma distância de aproximadamente 2.800 km de extensão, desde sua nascente na Serra da Canastra, Minas Gerais, até a divisa dos estados de Alagoas e Sergipe, onde deságua no Oceano Atlântico (ANA, 2015). A bacia hidrográfica do São Francisco é dividida em quatro regiões fisiográficas: Alto São Francisco, Médio São Francisco, Sub-médio São Francisco e Baixo São Francisco, as quais podem ser vistas na Figura 23. Os rios intermitentes da região hidrográfica do São Francisco estão apresentados na Figura 24.

Em sua área total, a Bacia do São Francisco consiste em 58% de regiões do semiárido nordestino. Essa área apresenta períodos de prolongadas estiagens, em consequência da baixa pluviosidade e alta evapotranspiração. Segundo dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a precipitação média anual na Região é de 1.003 mm, muito abaixo da média nacional, de 1.761 mm (ANA, 2016).

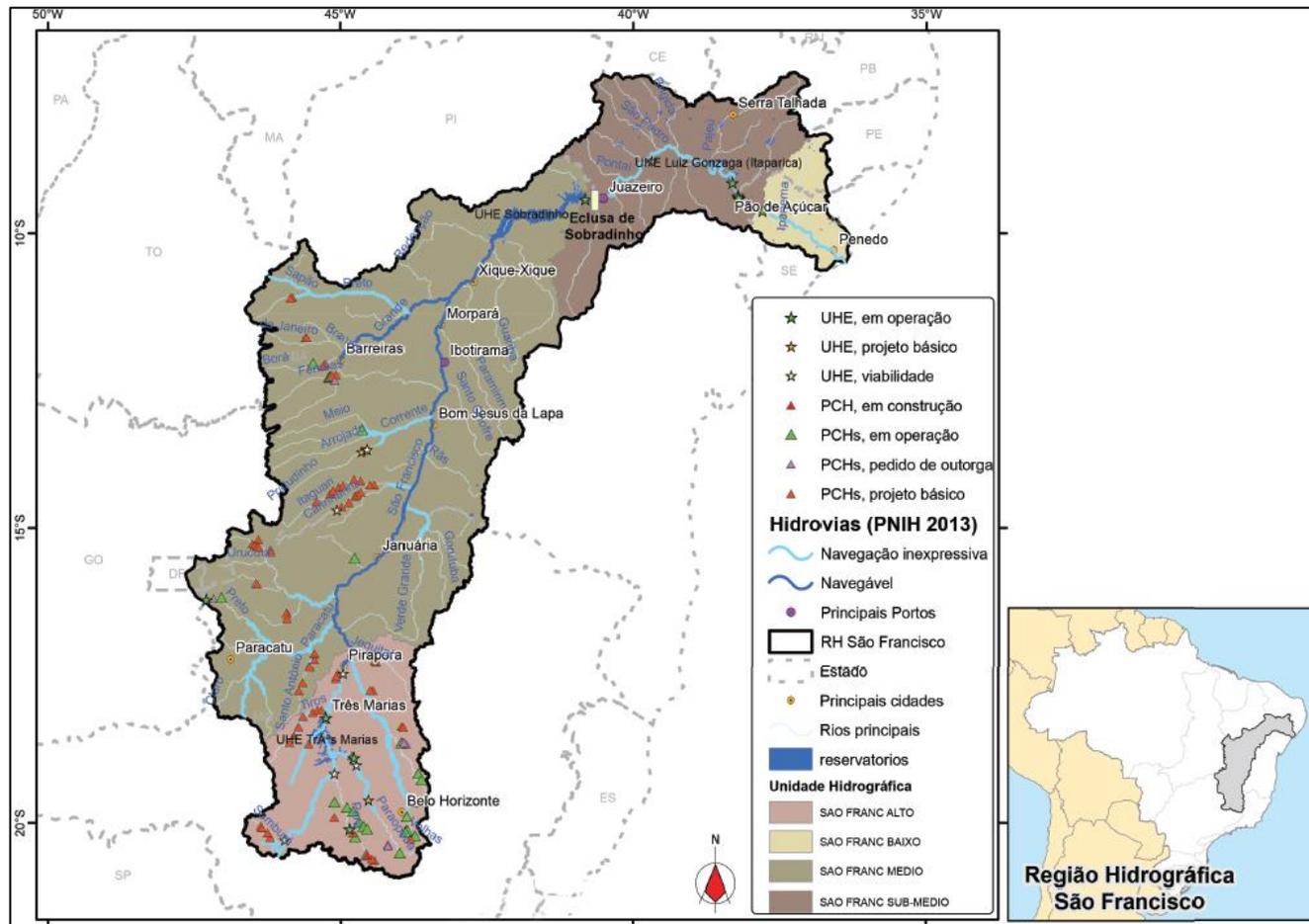


Figura 23 - Aproveitamentos Hidrelétricos e Hidrovias na região hidrográfica (RH) do São Francisco.

Fonte: ANA (2015).

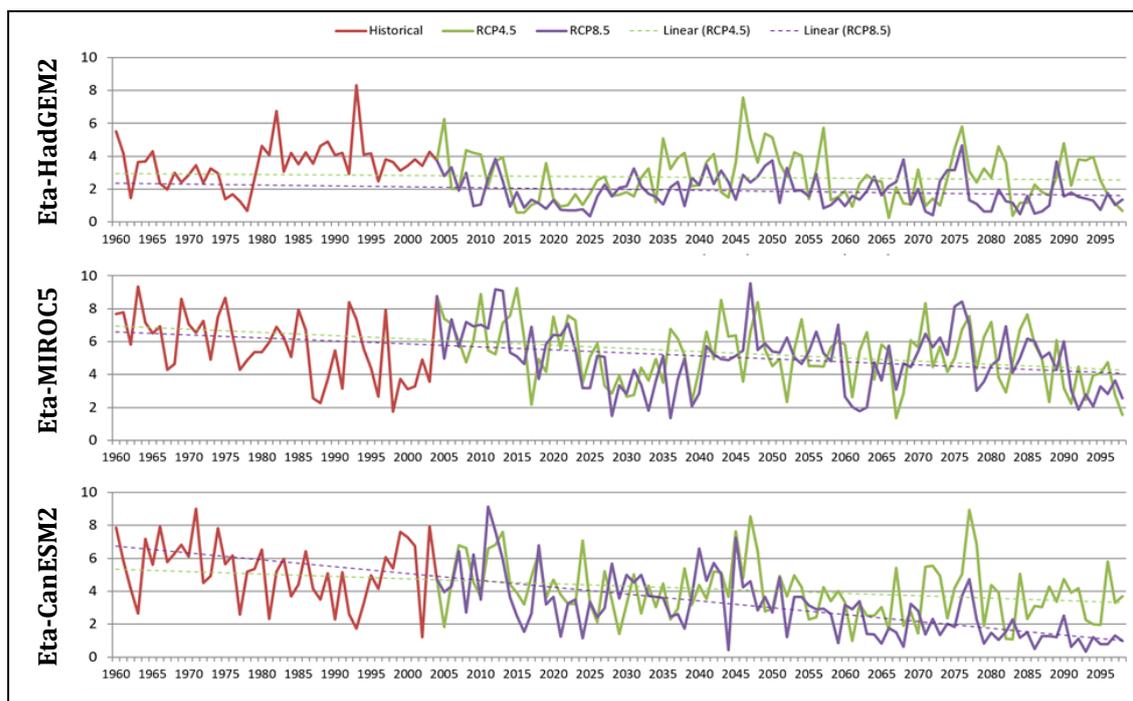


Figura 25 - Precipitação média na bacia do rio São Francisco simulado para o período histórico (vermelha) e período futuro nos cenários RCP4.5 (verde) e RCP8.5 (roxa).

Fonte: Chou et al. (2017).

O estudo também calcula o balanço hídrico climatológico para a região através da diferença entre precipitação e evapotranspiração em cada ponto de grade do modelo sobre a bacia. O balanço hídrico de superfície pode ser dado por (HARTMANN, 1994) (Equação 1), em que gw é o armazenamento de água abaixo da superfície; P é a precipitação por chuva ou neve; D é a condensação de superfície (queda de orvalho ou geada); E é a evapotranspiração e Δf é o escoamento:

$$gw = P + D - E - \Delta f \quad \text{Equação 1}$$

Já o balanço hidrológico resultando em médias de longo prazo, pode ser dado por (HARTMANN, 1994; PEIXOTO; OORT, 1992) (Equação 2):

$$\Delta f = P - E \quad \text{Equação 2}$$

Segundo as projeções, ocorrerá reduções de P-E no período de 2011-2040 em comparação ao período histórico (1961-1990), indicando um menor excedente hídrico

durante a estação chuvosa na bacia do rio São Francisco, principalmente na região fisiográfica do alto São Francisco (entre 3 e 6 mm/dia), como mostrado na Figura 26.

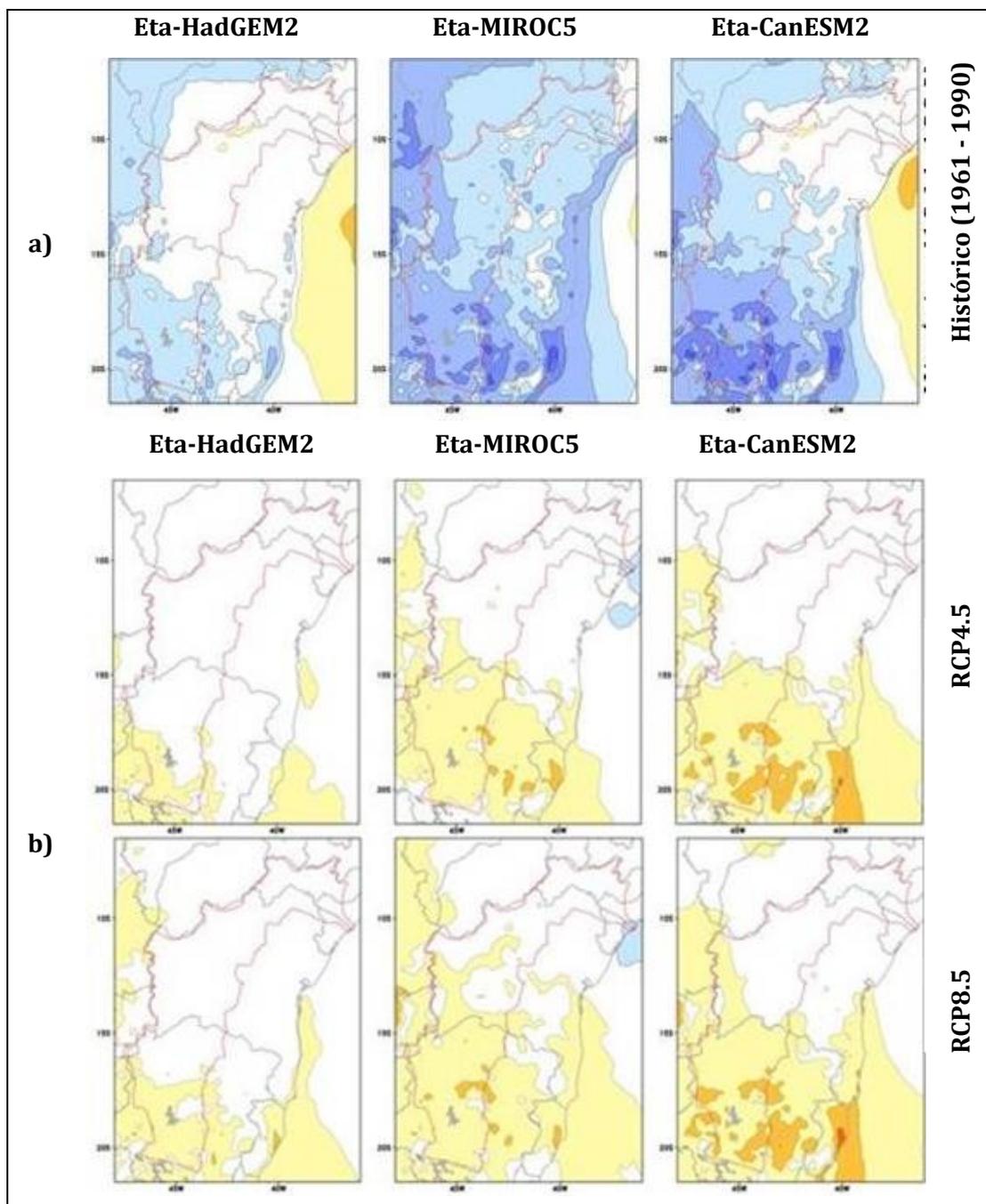


Figura 26 - (a) Precipitação menos Evapotranspiração, (P-E; mm/dia) do período histórico sobre a região da Bacia do rio São Francisco e (b) mudança (diferença entre P-E do período futuro 2011-2040 e P-E do período histórico), em RCP4.5 e RCP8.5.

Fonte: Chou et al. (2017).

Segundo Lyra et al. (2017), os máximos de temperatura da região fisiográfica do alto São Francisco apresentam aumentos de 9°C para temperatura máxima e 6°C para temperatura mínima até o final do século (como pode ser visto na Figura 27).

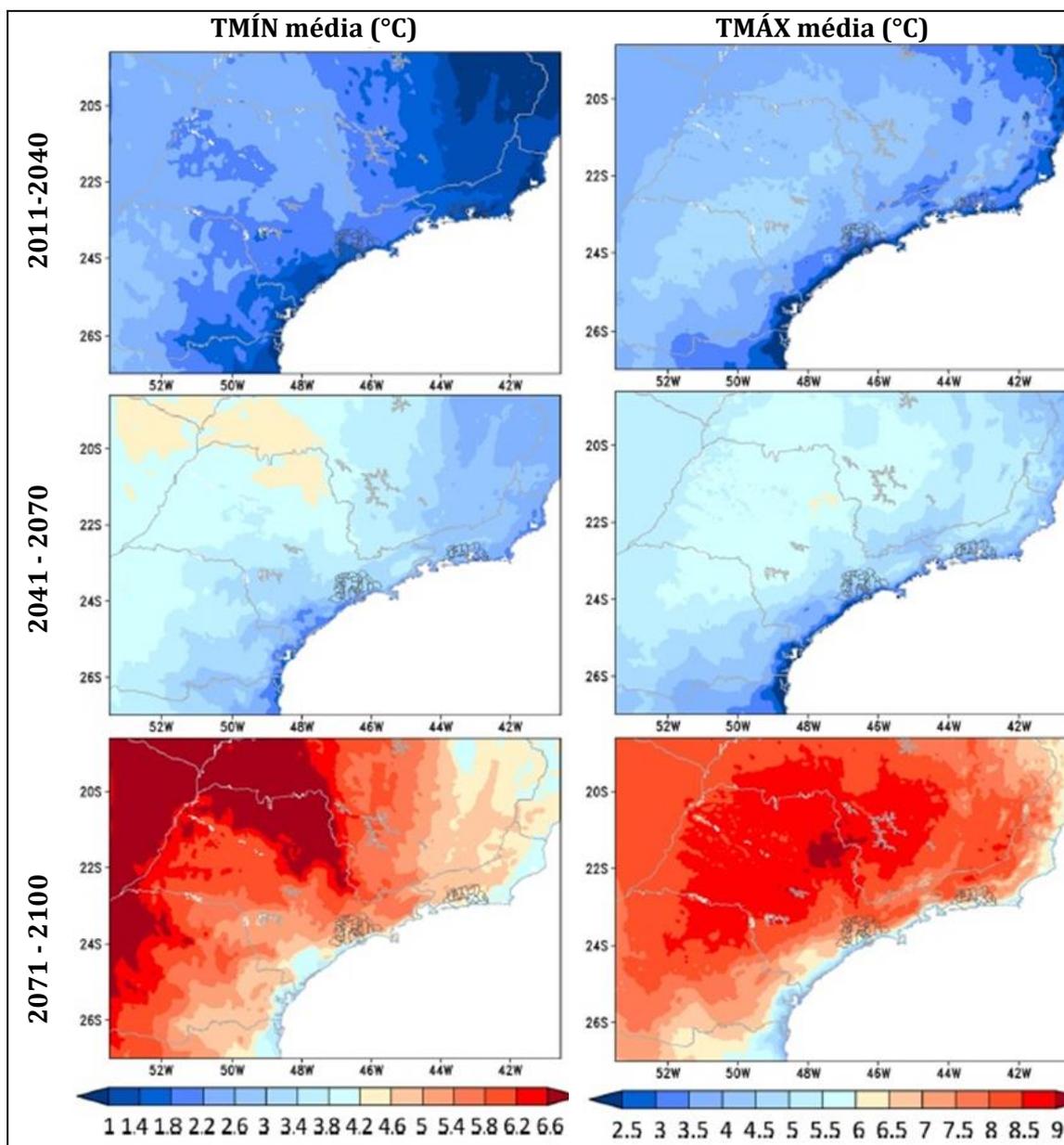


Figura 27 - Diferenças entre os três períodos de tempo futuro e o período histórico (1961-1990) no âmbito do cenário de RCP8.5. Colunas da esquerda para a direita: 1- Temperatura mínima média (°C) e 2- Temperatura máxima média (°C).

Fonte: Lyra et al. (2017).

Este estudo sugere o aumento de noites quentes e ondas de calor, aumentando em 190 noites por ano até o final do século, enquanto o número de ondas de frio aumenta em apenas 3 dias por ano.

Indica, ainda, uma redução na precipitação, podendo afetar o abastecimento e produção de energia na região, como visto na Figura 28. Além disso, prevê-se um aumento de extremos de precipitação (chuvas mais pesadas e tempestades).

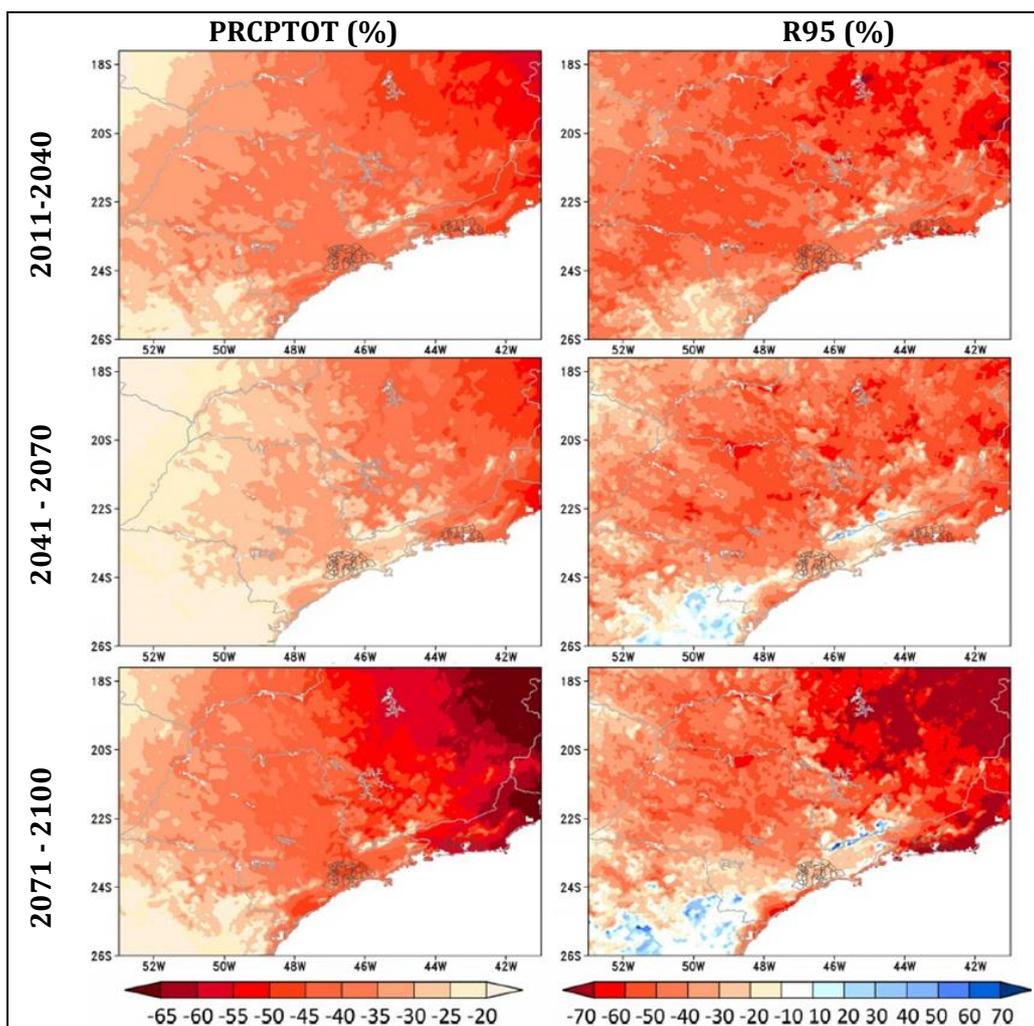


Figura 28 - Diferenças entre os três tempos futuros e o período histórico (1961-1990) no cenário RCP8.5. Coluna da esquerda PRCPTOT (%) e coluna da direita R95p (%). Os períodos futuros são 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100.

Fonte: Lyra et al. (2017).

5. ESTUDOS DE VULNERABILIDADE NO SETOR DA ENERGIA ELÉTRICA FRENTE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Segundo o MCTI (2016), em virtude das mudanças climáticas e seus impactos (secas e estiagens extremas) sobre a segurança hídrica no Brasil, deverá haver o aumento das energias renováveis, como a solar fotovoltaica, sistemas eólicos de pequeno porte e sistemas de geração a partir da biomassa, principalmente em áreas remotas do país. Isso ocorrerá como estratégia para complementar a produção de energia de modo a responder a demanda das atividades econômicas do país. Assim, neste tópico é realizado um levantamento de estudos recentes que avaliam o impacto das mudanças climáticas sobre o potencial disponível e/ou geração para as fontes hídrica, eólica, solar e biomassa.

5.1 Geração hidrelétrica

O Brasil é um dos grandes produtores mundiais de energia hidrelétrica, respondendo por 10% da produção mundial. De acordo com dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a participação da hidroeletricidade gira em torno de 64% da matriz energética brasileira (Figura 29). Esse sistema é fortemente dependente da disponibilidade hídrica de médio e longo prazo para a produção de energia firme e, portanto, para garantia de atendimento do sistema, significando uma alta vulnerabilidade a alterações no regime hidrológico.

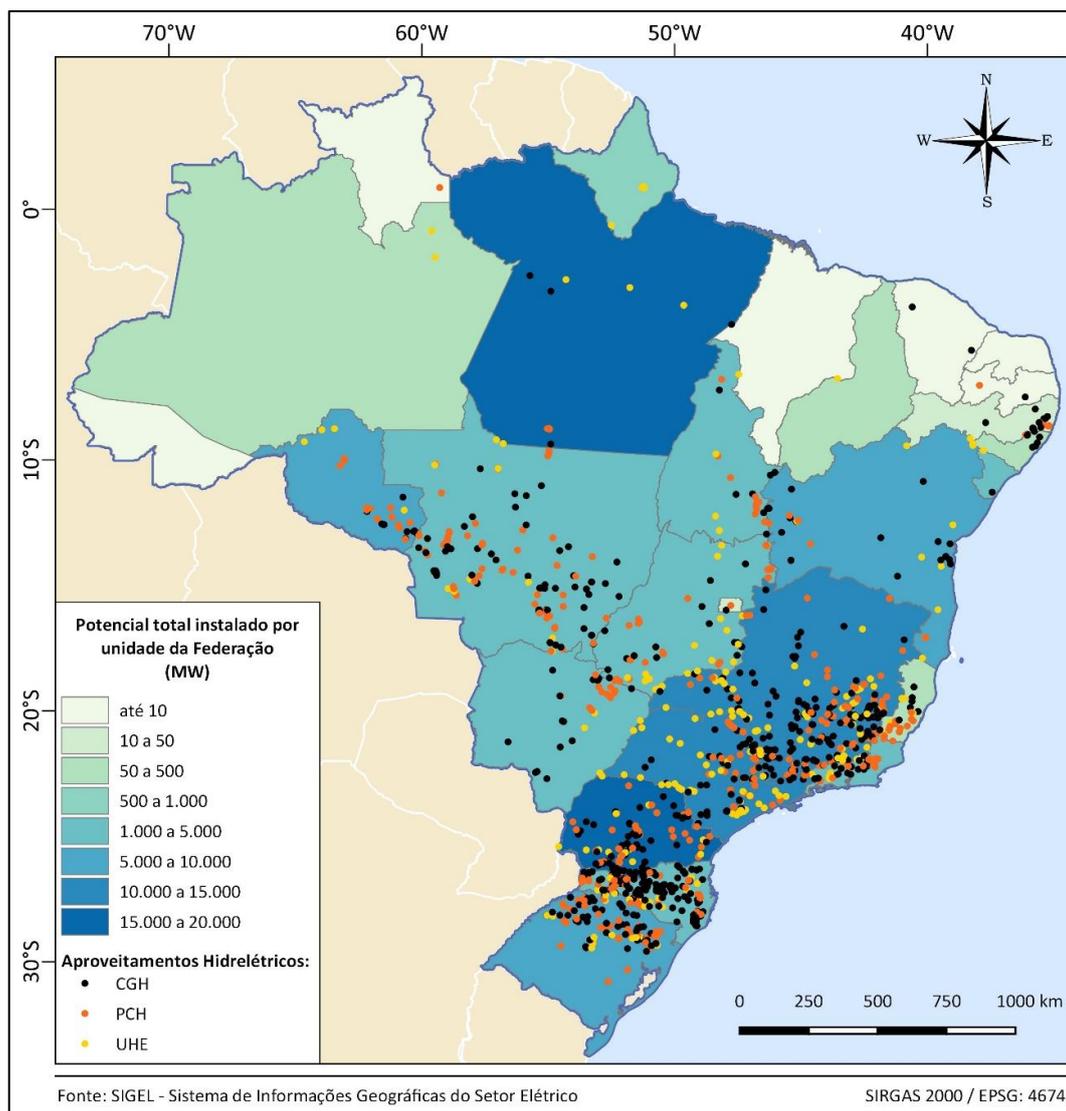


Figura 29 - Potencial total instalado hidroelétrico por unidade da federação (MW) e usinas hidroelétricas em operação.

Fonte: Dados tirados de SIGEL (2018).

Segundo a ANEEL (2014), o regime hidrológico e, conseqüentemente, a disponibilidade hídrica, pode variar principalmente devido a quatro fatores: os usos consuntivos da água, o uso e a ocupação do solo, a variabilidade climática e as mudanças climáticas. Dentre esses fatores, as mudanças no clima vêm despertando considerável preocupação nos dias atuais, que são causadas principalmente devido a grande emissão dos GEE na atmosfera (FBDS, 2009; ANEEL, 2014). Futuras mudanças

climáticas podem vir a alterar os padrões de precipitação, pois o aumento da temperatura média leva a alterações nos padrões de pressão atmosférica, ventos e evaporação (FREITAS; SOITO, 2008; SANTANA, 2013; LIMA; COLLISCHONN; MARENGO, 2014).

De acordo com Barros et al. (2006), é possível que as mudanças climáticas projetadas pelos modelos de clima globais já estejam em curso e manifestando seus efeitos nas séries de vazões dos rios no Brasil e em toda a América do Sul. Alguns rios mostram períodos recentes mais úmidos ou mais secos do que as médias de longo prazo. Entretanto, é muito difícil diferenciar o que seria uma tendência mais duradoura, associada às mudanças climáticas, do efeito da variabilidade climática de baixa frequência, como variações multianuais. Identificar tendências em séries hidrológicas é especialmente difícil quando as séries de dados de vazão são relativamente curtas, como é o caso no Brasil.

A identificação dos impactos das mudanças climáticas nas séries de vazão dos rios é complicada porque outros fatores como as mudanças do uso da terra e da água podem estar ocorrendo ao mesmo tempo. Estudos como os de Tucci e Clarke (1998) e Rodriguez et al., (2010) indicam que em algumas bacias brasileiras foram verificadas mudanças nas vazões médias em um período recente, que podem estar relacionadas tanto às mudanças no regime pluviométrico quanto às alterações no tipo de vegetação existente na bacia hidrográfica.

Muitos estudos disponíveis apontam, de maneira não conclusiva, para uma tendência de redução da precipitação – e, portanto, da disponibilidade hídrica – nas regiões Nordeste, onde a produção de hidroeletricidade é importante, e Norte, para onde está prevista sua expansão nos estudos da Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Conforme o Plano Nacional de Mudanças do Clima do MMA (2016b) em áreas fundamentais para a geração hidrelétrica no Brasil, como a região Sudeste e a bacia do rio Tocantins, não existe concordância entre os modelos climáticos sobre qual será a tendência de alteração no padrão de escoamento: se positiva ou se negativa. Por outro lado, o mesmo Plano Nacional aponta um potencial de aumento da produção na região

Sul em decorrência da previsão de elevação na precipitação; no entanto, o aproveitamento desse potencial depende da capacidade de armazenamento e aproveitamento desses excedentes.

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), sensível à necessidade de avaliar esse impacto que é de interesse nacional e de grande relevância para o setor elétrico, define, em 2008, um tema relacionado com o impacto das mudanças climáticas na geração de energia elétrica, como sendo como um dos temas estratégicos/prioritários de projetos de pesquisa e desenvolvimento (P&D). Esse tema que foi classificado como Tema 10, só foi efetivamente iniciado seus estudos a partir de outubro de 2011. O projeto ANEEL PE-0064-1024/2011, denominado *“Efeitos de mudanças climáticas no regime hidrológico de bacias hidrográficas e na energia assegurada de aproveitamentos hidrelétricos”* focou na geração energia hidroelétrica, sendo finalizado em 2014 e seus resultados foram sintetizados em Lima et al. (2014). Em função do objetivo do projeto, a avaliação do impacto das mudanças climáticas na disponibilidade de energia necessitou do envolvimento de equipes especializadas em áreas bastante distintas, desde o especialista em climatologia até o engenheiro eletricista que determina os despachos viáveis das usinas do sistema elétrico. Em função da diversidade do conhecimento para desenvolver esse projeto, foram reunidos especialistas de várias áreas do conhecimento grupados em Clima, Hidrologia, Usos do solo, Usos Consuntivos e Energia. Conforme mencionado, diversos trabalhos foram realizados sobre o tema de mudanças climáticas, mas de forma segmentada focando algumas bacias, efeitos em regiões específicas, etc.. Este trabalho apresentou uma primeira visão integrada, simulando a coordenação energética da forma como atualmente é realizada pelo Operador Nacional do Sistema (ONS). Dada à dimensão do trabalho e com os dados disponíveis naquela oportunidade, o modelo global HadCM3 do *Hadley Center* foi utilizado com a versão do IPCC 2007 (AR4) uma vez que já haviam sido testados pelo INPE e representava bem a climatologia da América do Sul. Conforme já mencionado, o INPE havia feito o *“downscaling”* para 4 membros do HadCM3 utilizando o modelo regional Eta 40 e foi possível obter variáveis como precipitação, temperatura, etc., com precisão de quadrículas de 40 km. As trajetórias das variáveis climáticas para 4

períodos de 30 anos (1961-90, 2011-40, 2041-70 e 2071-99) foram utilizadas para obter as vazões através do modelo chuva-vazão MGB-IPH da UFRGS. Apesar de terem sido incluídos outros modelos globais para obtenção das vazões, o modelo HadCM3-Eta 40 era o mais preciso e uma análise mais profunda foi realizada inclusive no cálculo das energias asseguradas utilizando o modelo NEWAVE (MACEIRO et al., 2002). Uma evolução do modelo global HadCM3 disponibilizado no AR5 do IPCC de 2014 é o HadGEM2-ES já mencionado.

Ainda com relação ao projeto P&D 10 ANEEL, Lima et al., (2014) informa que várias equipes trabalharam para ajustar e calibrar o modelo chuva-vazão MGB-IPH das usinas do Sistema Interligado Nacional (SIN) para todas as bacias brasileiras e obter as vazões para os 4 membros do Eta-HadCM3. Esses membros tinham uma relação com o cenário de aumento de temperatura, ou seja, perturbaram o cenário A1B e como resultado obtiveram aumentos na temperatura de 2 a 6 graus até o ano de 2100. As aflúências obtidas para as 28 bacias onde as usinas hidráulicas do SIN estão localizadas serviram de dados de entrada para o modelo NEWAVE (MACEIRO et al., 2002). As usinas são responsáveis pela transformação das aflúências em energia elétrica e o montante de energia gerada depende da configuração deste conjunto de usinas. Nesse projeto (LIMA et al., 2014) foram utilizados dois conjuntos básicos de usinas denominados de Parque Gerador Existente (PGE) e Parque Gerador Futuro (PGF). O parque existente representava o conjunto de usinas disponíveis em 2012, enquanto que o parque futuro o conjunto previsto para o ano de 2030 de acordo com o Plano Nacional Energético de 2030 (PNE 2030) da EPE.

A Figura 30 apresenta o resultado da comparação entre as variações da energia assegurada para o PGF e o PGE, considerando as simulações realizadas com os dados de vazões naturais afluentes gerados a partir de informações climáticas do membro controle (o membro principal dos quatro utilizados) do modelo ETA-40. De uma forma geral, observa-se uma diminuição da energia gerada utilizando a métrica energia assegurada (carga crítica) para a comparação entre os três períodos futuros e o período base de 1961 a 1990.

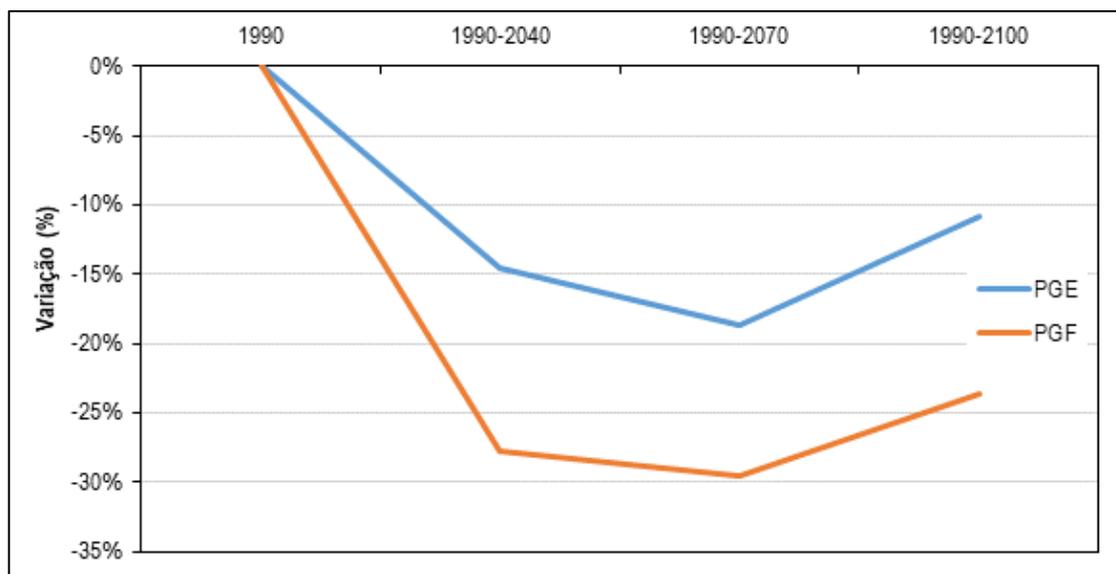


Figura 30 - Variação da carga crítica simulada pelo Eta40 comparando o de Parque Gerador Existente e Parque Gerador Futuro.

Fonte: Lima et al. (2014).

O modelo Eta aninhado ao modelo global HadCM3 indica um aumento de precipitação na região Sul do Brasil e uma diminuição nas regiões Norte e Nordeste. Na região de convergência do Atlântico Sul onde se situa a região Sudeste e Centro-Oeste, os membros do modelo não apontam para uma tendência específica de diminuição ou crescimento.

As variações de energia assegurada (carga crítica) são mais acentuadas para o PGF em relação ao PGE. Isso é justificado pela opção de expansão do parque gerador através da adição de novas usinas hidrelétricas na região Norte, onde ocorre uma diminuição nas precipitações devido ao efeito da mudança climática (LIMA et al., 2014). O aumento relativo da energia assegurada nas últimas três décadas observado nas simulações não foi explicado no âmbito do projeto P&D ANEEL 10. Dado que há uma previsão de atualização dos resultados deste projeto para o AR5, esta tendência poderá ser melhor avaliada. Segundo Lima et al. (2014), isso demonstra a necessidade de considerar os efeitos das mudanças climáticas nos estudos de planejamento de expansão principalmente quanto a adoção de usinas hidráulicas.

De acordo com Lima et al. (2014), os estudos existentes prévios ao do P&D 10 ANEEL, com relação aos impactos das mudanças do clima projetadas para o futuro sobre as vazões dos rios e sobre a produção de energia hidrelétrica, são limitados em diversos aspectos. Alguns estudos são limitados a uma ou duas bacias hidrográficas, como é o caso do trabalho de Nóbrega et al. (2010). Outros estudos são limitados no que se refere às considerações da incerteza das previsões, porque são baseados em um único modelo climático global. Já os trabalhos de Shaeffer et al. (2008) e Lucena et al. (2009), que são pioneiros porque estão focados na geração de energia hidrelétrica e abrangem todo o Sistema Interligado Nacional, são limitados em termos da metodologia utilizada para analisar os impactos hidrológicos.

De acordo com LUCENA (2010) e SAE (2015), a geração de energia hidroelétrica depende diretamente das vazões afluentes aos empreendimentos hidroelétricos, que são influenciadas pelas variações na temperatura, precipitação e evaporação, variáveis que tendem a sofrer alterações devido às mudanças climáticas. Conseqüentemente, essas alterações do clima podem afetar significativamente os sistemas energéticos brasileiros, tanto na produção quanto no consumo de energia, pois as fontes de energias renováveis, inclusive a hidroelétrica, são especialmente sensíveis a essas mudanças, sendo sua renovabilidade dependente basicamente do clima (LUCENA, 2010; SAE, 2015). No caso da geração hidrelétrica, estudos como os de Freitas e Soito (2008) apontam que as bacias hidrográficas menos reguladas (aquelas que possuem as usinas conhecidas como “fio d’água”), as que sofrem com eventos extremos e aquelas que são exploradas de maneira indevida são as que apresentam maior vulnerabilidade com relação aos efeitos das mudanças climáticas nos recursos hídricos. Nos recursos hídricos, as principais alterações podem levar a redução da disponibilidade hídrica em algumas áreas e ao aumento do número e da intensidade de eventos extremos, como cheias e secas (MCTI, 2016).

A quantidade de energia que pode ser gerada por uma hidrelétrica não depende apenas de sua capacidade instalada, mas também da variação das vazões afluentes a usina (SCHAEFFER et al., 2012). Os principais parâmetros climáticos que interferem nas

vazões dos rios são a temperatura média da atmosfera e a precipitação. Sendo assim, como a geração de energia elétrica no Brasil é baseada na hidroeletricidade, a mesma apresenta significativa vulnerabilidade às mudanças climáticas (MMA, 2016b; ANA, 2016).

Segundo Teotónio et al. (2017), os impactos das mudanças climáticas na geração hidroelétrica podem ser de dois tipos: diretos, como as mudanças nas variáveis hidrometeorológicas que afetam diretamente a disponibilidade de água para geração de energia; e indiretos, como o aumento dos conflitos devido à escassez de água. Como o planejamento e a operação dos sistemas hidrelétricos são baseados em padrões climáticos históricos, as mudanças climáticas podem afetar a operação de usinas existentes e até comprometer a viabilidade de novos empreendimentos.

Como descrito em Schaeffer et al. (2012), o planejamento e a operação do sistema, que já são atividades incertas devido à variabilidade climática natural, podem se tornar muito mais incertas devido às mudanças no clima. Tal estudo, ainda mostra que a localização geográfica, a integração do sistema de transmissão e as características individuais das usinas hidrelétricas estão diretamente relacionadas com a intensidade dos impactos que o sistema irá receber. Quanto maior a interconexão do sistema, melhor sua capacidade de contornar algum problema que venha a surgir a partir da compensação permitida pelas diferentes variações regionais, principalmente no caso de países de grandes extensões, como o Brasil (SCHAEFFER, et al., 2012). A opção do setor nos últimos anos de expandir a produção a partir de reservatórios a fio d'água, apesar de reduzir os impactos sobre o meio ambiente, pode adicionar vulnerabilidades em um possível cenário de períodos de extremos mais longos e severos, uma vez que essas usinas dependem exclusivamente do escoamento dos rios (SCHAEFFER, et al., 2012; TEOTÓNIO et al., 2017). Centrais hidrelétricas com reservatórios de regularização podem atenuar os efeitos das variações de vazões, influenciando não apenas a sua geração, mas também a de usinas a jusante (MMA, 2016b; TEOTÓNIO et al., 2017). Reservatórios com menores áreas de superfície são menos afetados quando

comparados aos de grandes áreas devido o menor potencial de evaporação (TEOTÓNIO et al., 2017).

Estudo realizado pelo Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável (CEBDS) mostra que, dependendo da capacidade instalada, as usinas estão sujeitas a diferentes tipos de impactos e, conseqüentemente, deve-se buscar formas distintas para a redução de suas vulnerabilidades, entre elas, o suprimento com outras fontes de energia nos meses de déficit hídrico. Além disso, maior capacidade de reservação e possibilidade de regularização de corpos d'água significam redução de vulnerabilidades para os demais usos da água, em especial, o abastecimento humano (MMA, 2016b).

No relatório SAE (2015) foi aplicado dois modelos de clima global (HadGEM2-ES, MIROC5) no modelo regional Eta e foram verificadas as projeções climáticas para o território brasileiro nos períodos de 2011- 2040; 2041-2070 e 2071-2100, com os cenários de RCP8.5 e RCP4.5. As vazões foram calculadas com o modelo hidrológico *Soil Moisture Accounting Procedure* – SMAP, que transformou chuva em vazão, para 24 bacias do país. Para as demais bacias, as vazões foram determinadas pelos autores, a partir de regressões lineares mensais. Segundo os autores, as anomalias de vazões para o século XXI, das projeções Eta-HadGEM2-ES mostram reduções em praticamente todos os postos do Sistema Interligado Nacional (SIN), enquanto as projeções Eta-MIROC5, mostram aumento de vazão em alguns postos das regiões Sudeste e Sul e reduções na região Norte (Figura 31).

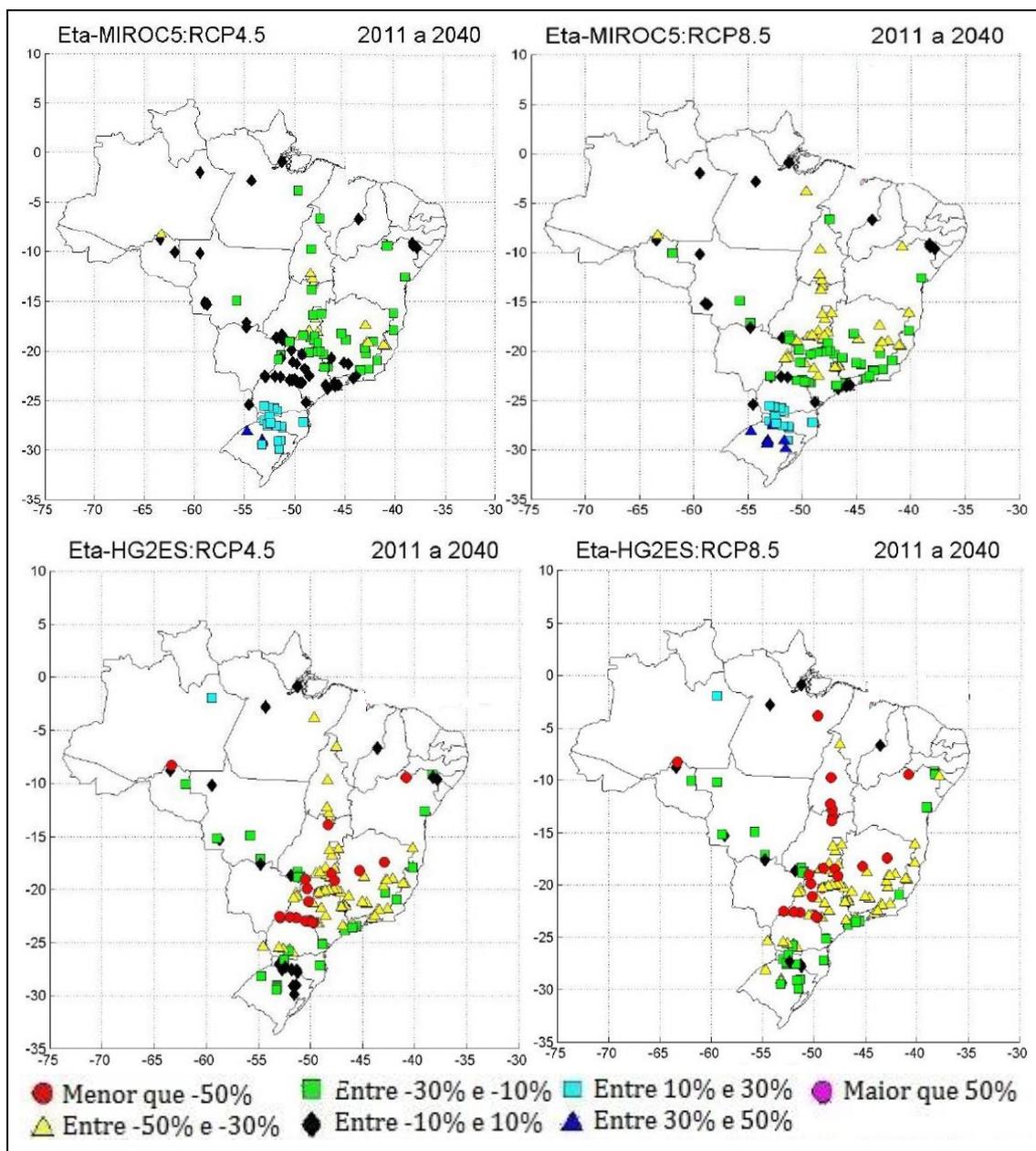


Figura 31 - Anomalia de vazões médias anuais (%) para o período 2011-2040, nos modelos Eta-MIROC5 e Eta-HadGEM2-ES, para os cenários RCP4.5 e RCP8.5.

Fonte: SAE (2015).

5.1.1 Contextualização para a bacia do rio São Francisco

Segundo a ANA (2016), a Região do São Francisco tem importante papel na geração de energia elétrica, com potencial instalado de 10.802 MW (10% do total do País) (Figura 32), podendo atingir 14.194 MW com os aproveitamentos em estudo e em construção

(Figura 33). Destacam-se as usinas de Xingó (3.162 MW), Paulo Afonso IV (2.462 MW), Luiz Gonzaga (1.479 MW) e Sobradinho (1.050 MW). O aproveitamento hidrelétrico do rio São Francisco representa a base de suprimento de energia do Nordeste.

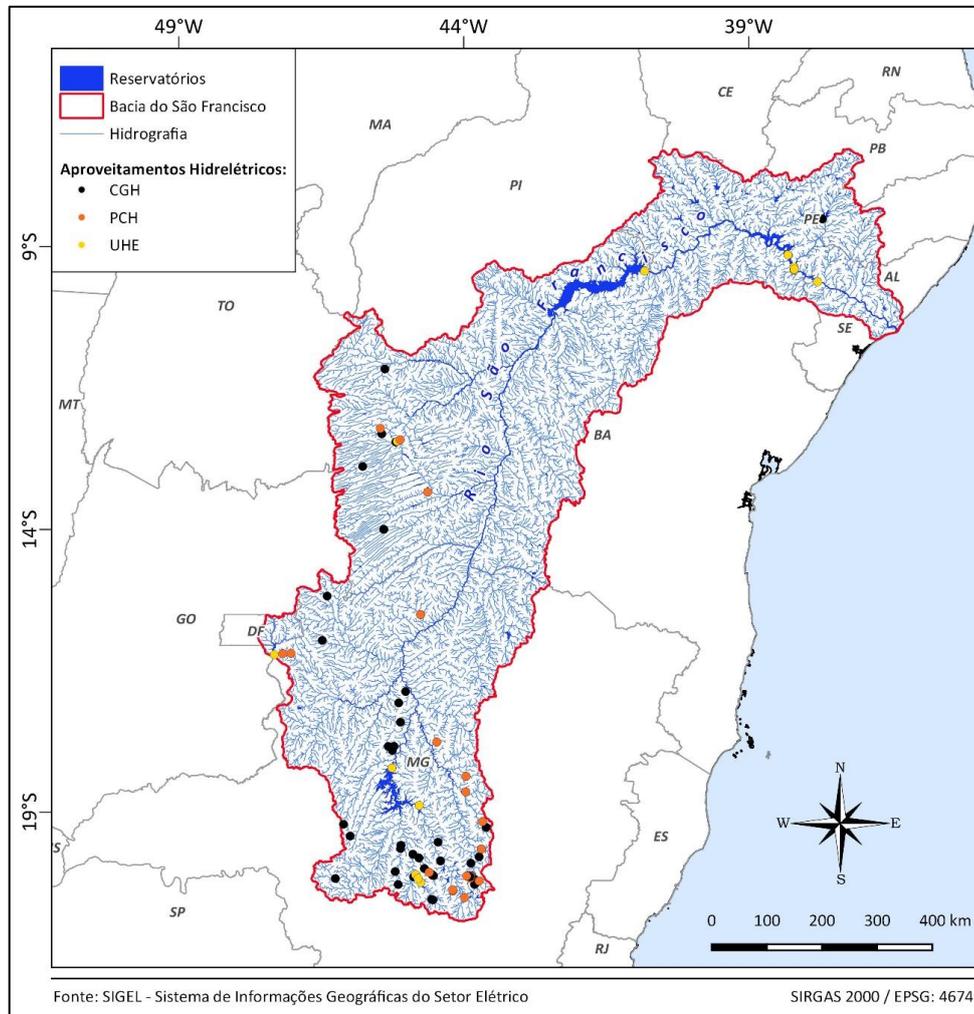


Figura 32 - Aproveitamentos hidrelétricos em operação na bacia do São Francisco.

Fonte: SIGEL (2018).

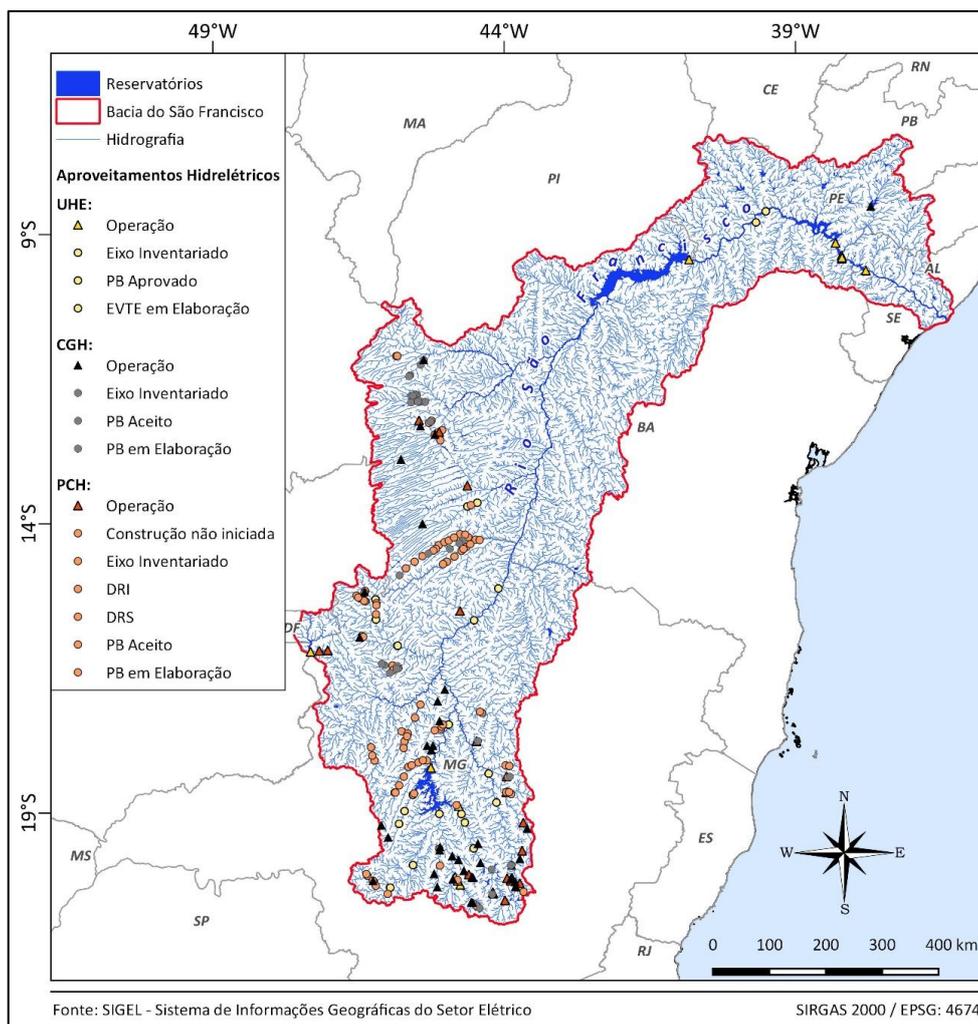


Figura 33 - Aproveitamentos hidrelétricos na bacia do São Francisco.

Fonte: SIGEL (2018).

De acordo com a ANA (2016), desde 2013 a bacia do rio São Francisco vem enfrentando condições hidrológicas adversas, com vazões e precipitações abaixo da média, com consequências nos níveis de armazenamento dos reservatórios instalados na bacia. O segundo maior reservatório na calha do rio São Francisco, Três Marias (MG) desempenha um papel fundamental de regularização do manancial, pois está na parte mais alta da bacia e permite que a água armazenada seja liberada para o trecho a jusante (rio abaixo) em períodos de seca. Assim como acontece com Sobradinho, Três Marias tem sofrido uma redução de seu volume acumulado em função das condições hidrológicas adversas com vazões e chuvas abaixo da média.

Projeções de vazão para a bacia do São Francisco serão apresentadas no Produto 4 (Metodologia para Uso Consuntivo da Água), onde será desenvolvido o estudo de caso.

5.2 Geração eólica

O estudo publicado pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL (2017) intitulado “*Atlas do Potencial Eólico Brasileiro: Simulações 2013*” indica a disponibilidade de ventos médios em diferentes alturas para o Brasil. Na Figura 34 é ilustrada a caracterização da velocidade média anual e densidade de potência para a altura de 100 metros, na qual as regiões Nordeste e Sul se destacam quanto aos maiores potenciais.

As turbinas eólicas normalmente começam a gerar eletricidade a uma velocidade do vento de 3 a 5 m/s, atingindo potência máxima para 11 a 12 m/s e geralmente possuem velocidade de corte na casa dos 25 m/s (IRENA, 2018).

Grubb et al. (1993), afirma que, para que a energia eólica seja considerada tecnicamente aproveitável, é necessário que sua densidade seja maior ou igual a 500 W/m^2 , a uma altura de 50 m, o que requer uma velocidade mínima do vento de 7 a 8 m/s. Já para Schaeffer et al. (2008), a velocidade mínima considerável para o aproveitamento eólico é de 6 m/s e valores acima de 8,5 m/s são considerados de altas velocidades.

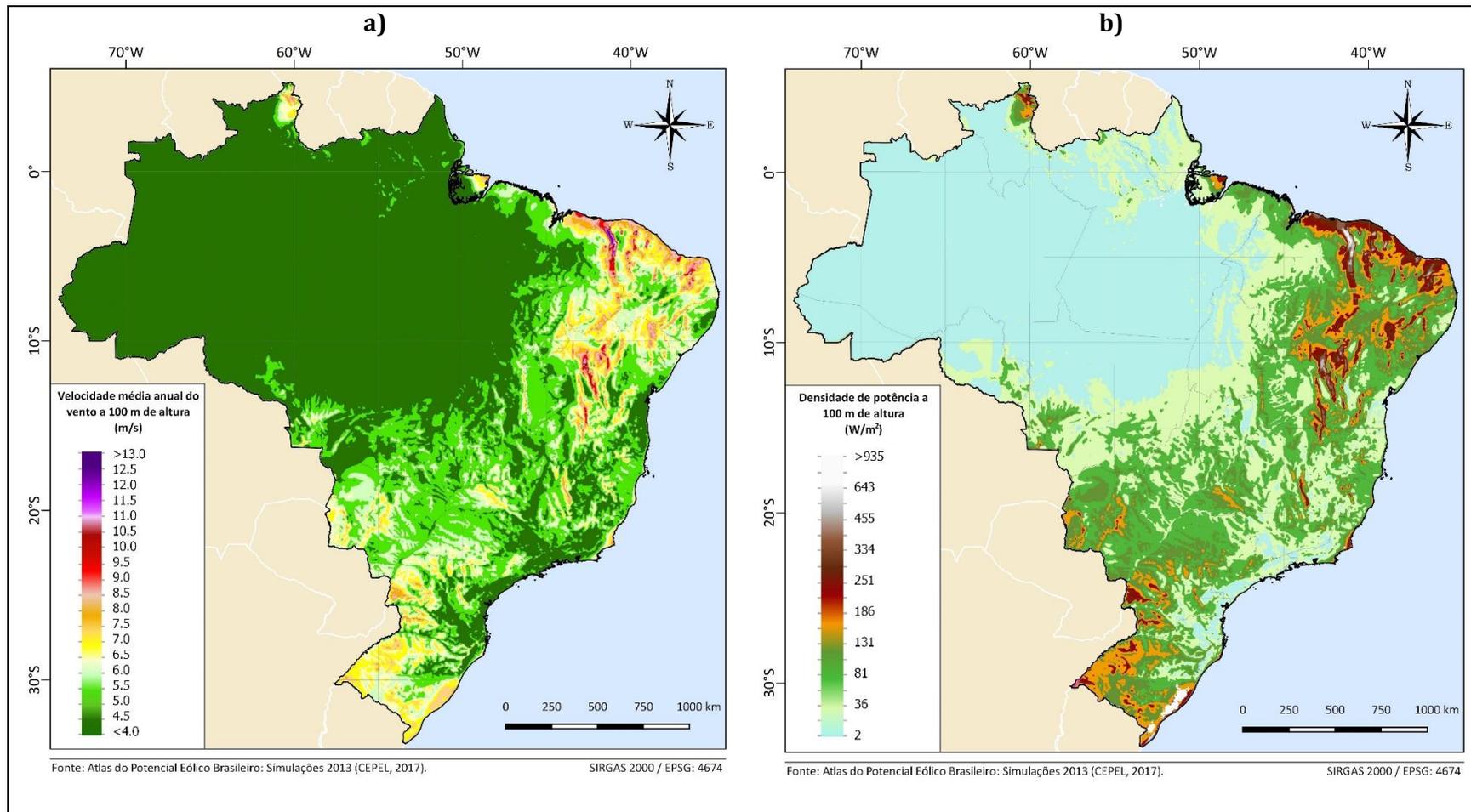


Figura 34 - Mapa temático brasileiro para a altura de 100m (a) velocidade média anual do vento e (b) densidade de potência.

Fonte: CEPEL (2017).

Segundo a EPE (2018), no ano de 2017 a geração eólica atingiu 7,82% (12,3 GW) da capacidade instalada do parque gerador brasileiro, tendo tido um aumento expressivo nos últimos 10 anos, conforme pode ser constado na Figura 35. Essa taxa de crescimento deu-se em parte devido a incentivos concedidos à fonte pelo governo, como redução na nas alíquotas dos impostos nas vendas e importação de peças usadas na fabricação de aerogeradores, implementação de planos de ação conjunta com disponibilização de recursos para promoção da fonte, entre outros.

Em percentuais de energia elétrica gerada, a fonte correspondeu no ano de 2017, a 7,2% do total gerado.

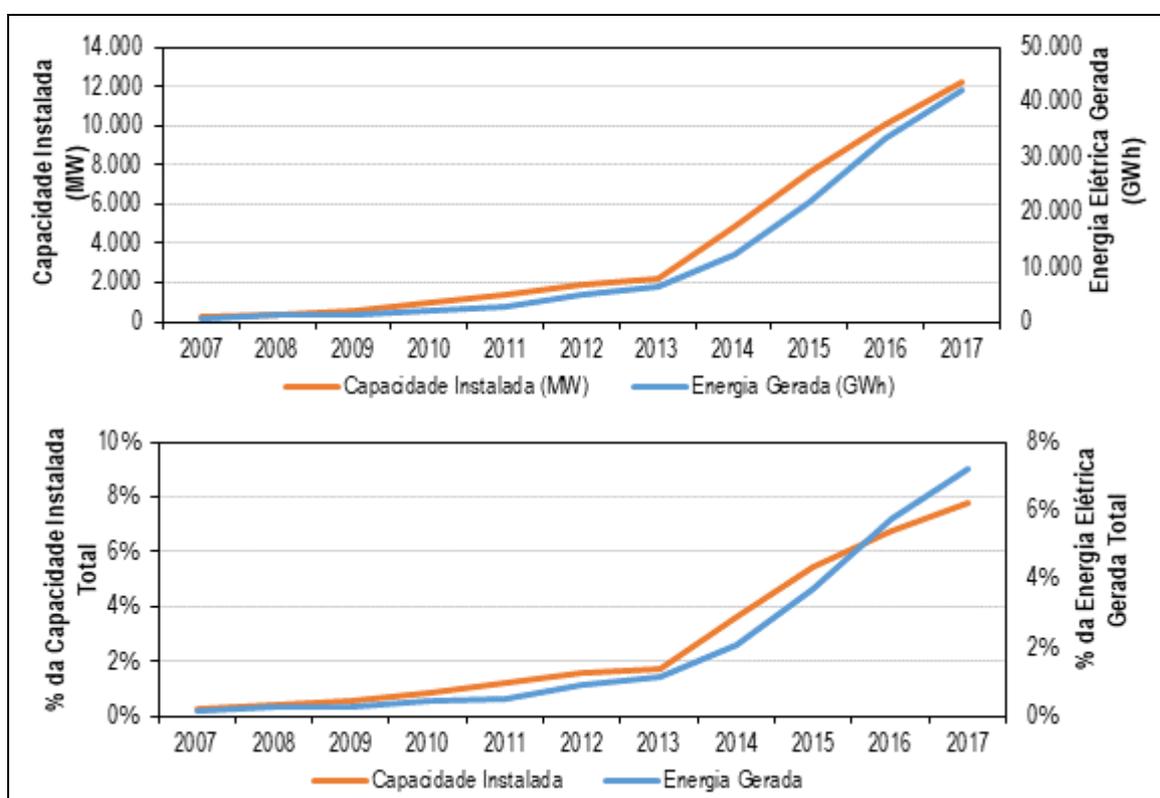


Figura 35 - Evolução da participação da geração eólica na matriz energética brasileira nos últimos 10 anos.

Fonte: EPE (2017, 2018).

De acordo com os dados mais recentes do Banco de Informações de Geração (BIG) (ANEEL, 2018), entre os futuros empreendimentos de geração renováveis, as centrais eólicas possuem maior representatividade, compreendendo cerca de 225

empreendimentos (em construção e em construção ainda não iniciada), totalizando 5,2 GW a mais de capacidade de geração, evidenciando a sua importância para composição da matriz energética brasileira. Potenciais registrados na ANEEL com Despachos de Registro de Recebimento de Requerimento de Outorga (DRO) totalizam 48,8 GW. Especialmente, os projetos se concentram nas regiões Nordeste e Sul do país (Figura 36).

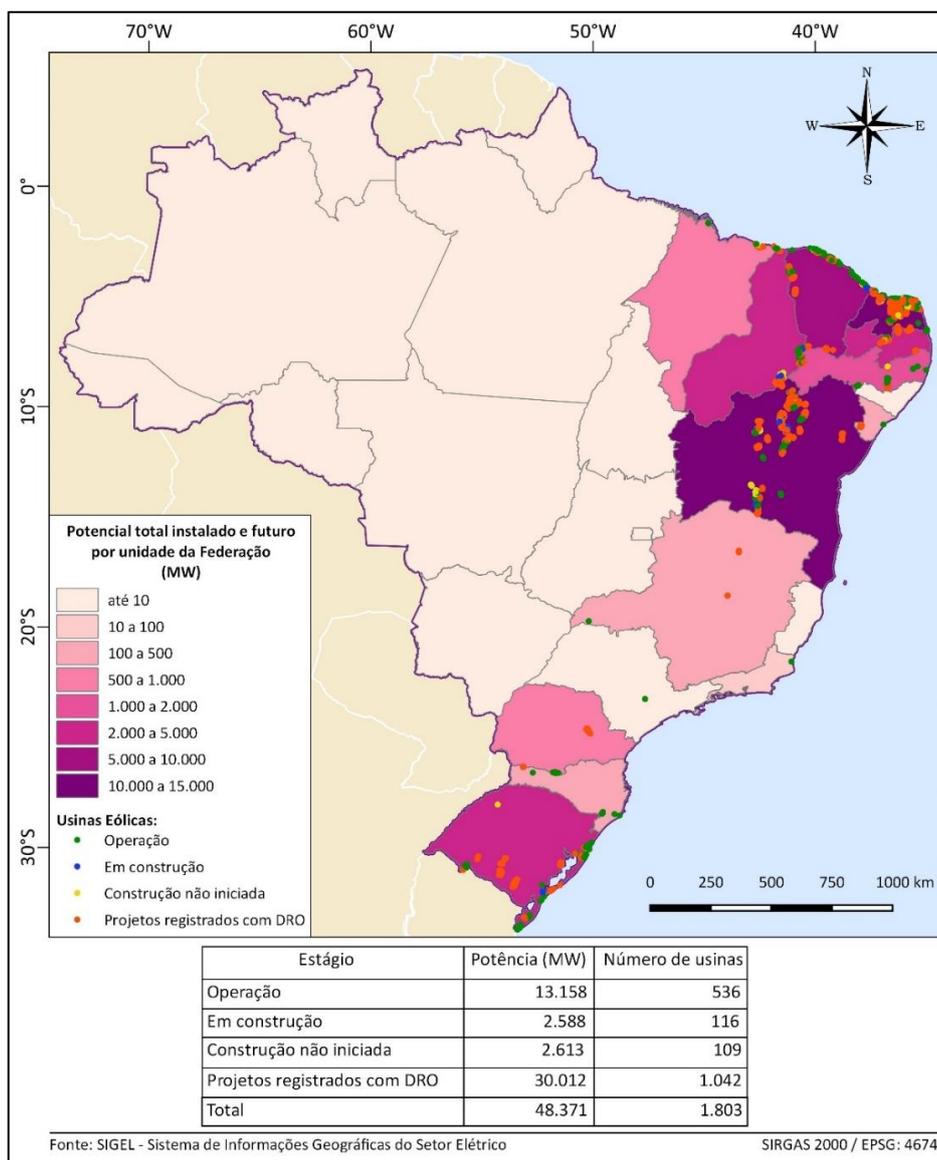


Figura 36 - Cenário atual do potencial de geração eólica na matriz energética brasileira.

Fonte: SIGEL (2018).

Quanto à geração observada nas centrais em operação, segundo os boletins do Operador Nacional do Sistema (ONS), no ano 2017 o fator de capacidade médio verificado no Subsistema NE foi superior ao previsto cerca de 5% e, no Subsistema S, inferior cerca de 4% (Figura 37).

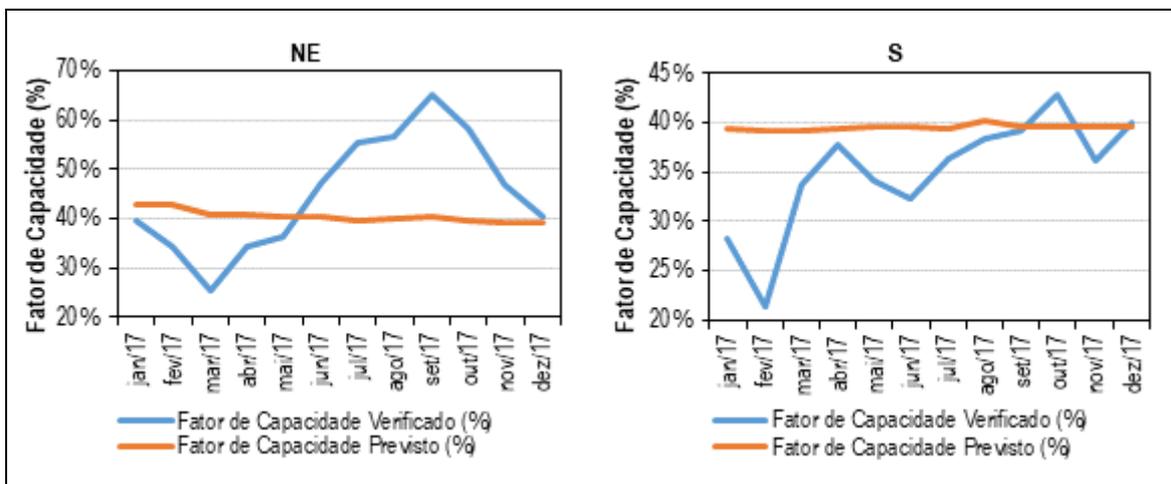


Figura 37 - Boletim de geração eólica para o ano de 2017.

Fonte: ONS (2018).

De acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia - PDE 2026 (MME/EPE, 2017), a capacidade instalada proveniente de fonte eólica pode chegar a representar aproximadamente 13,4% (28,5 GW) do parque gerador brasileiro em 2026, o que corresponderia a 12,3% da energia gerada total, aproximadamente 111 TWh, conforme projeção de crescimento detalhada na Figura 38.

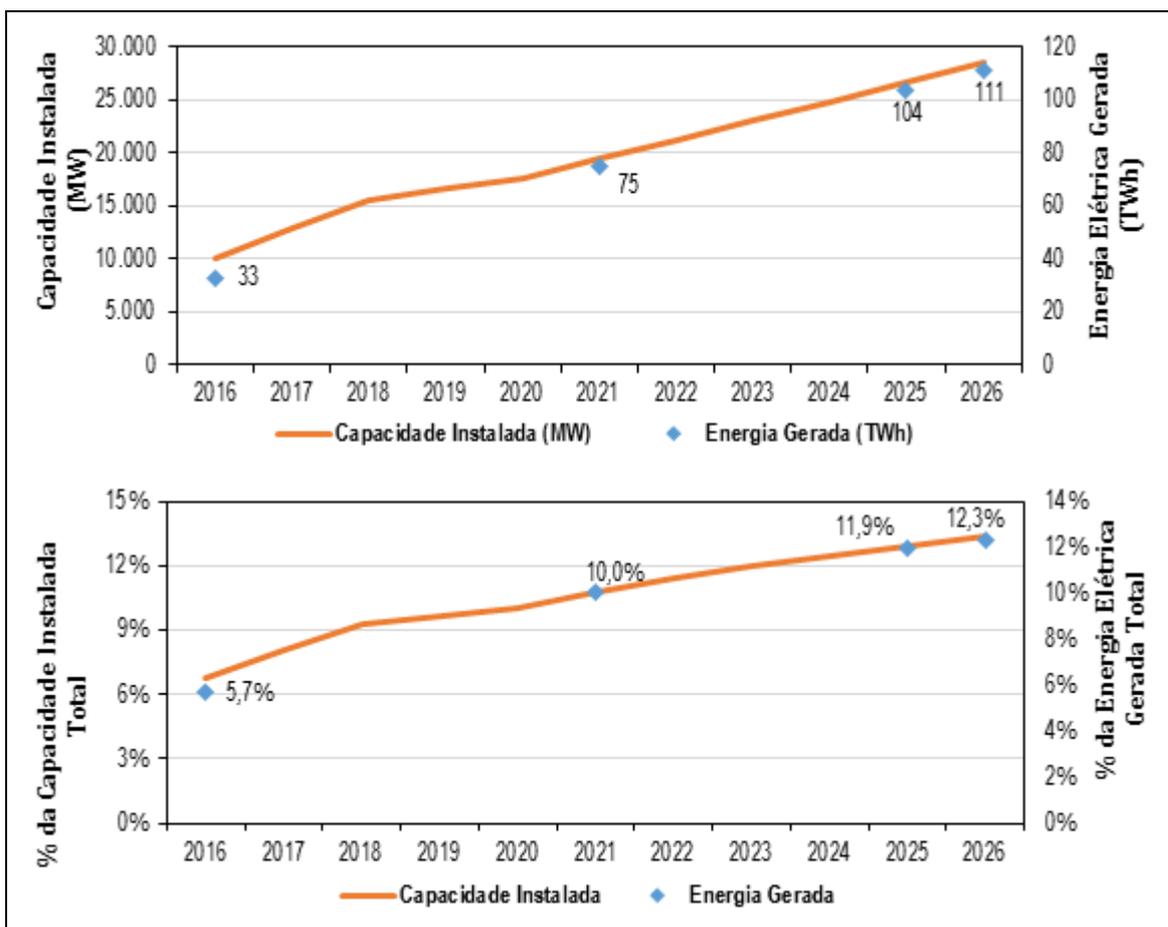


Figura 38 - Projeção de expansão até 2026 para a geração eólica na matriz energética brasileira.

Fonte: MME/EPE (2017).

5.2.1 Estudos de projeção de ventos para cenários de mudanças climáticas

Conforme detalhado anteriormente, a geração de energia eólica possui forte dependência com fatores meteorológicos e climáticos, associados a outros fatores tais como orografia, rugosidade e cobertura do solo. Portanto, mudanças dos fatores meteorológicos podem afetar ou modificar o vento a superfície. Assim, no planejamento energético, a disponibilidade e nível de confiança nas estimativas do potencial de geração eólica dependem da caracterização do comportamento do regime de ventos a médio e longo prazo (velocidade, direção e desvio padrão da velocidade).

O efeito das mudanças climáticas no regime de ventos e, conseqüentemente, sobre os recursos de energia eólica, é objeto de diversos estudos científicos, nos quais são usados dados de modelos de circulação geral, ajustados considerando cenários de mudanças climáticas, e dados de séries históricas em estações meteorológicas de coleta de dados. Dessa forma, o presente estudo avalia para o cenário brasileiro, com base na revisão de literatura, os possíveis impactos das mudanças climáticas sobre o potencial eólico para geração de energia elétrica.

O relatório intitulado “*Mudanças Climáticas e Segurança Energética no Brasil*”, elaborado pelo Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (Coppe) /UFRJ e apresentado em Schaeffer et al. (2008), aborda a questão do potencial eólico brasileiro usando projeções futuras do modelo climático regional PRECIS, rodado com as condições de contorno do modelo climático inglês HadCM3 para os cenários climáticos de altas e baixas emissões de GEE, A2 e B2, pertencente à família de cenários do IPCC AR4. Para calcular o potencial de geração de energia eólica, foram utilizados os números de velocidade média anual do vento projetados pelo modelo para o período 2071–2100, numa resolução de 50 km x 50 km, e as características técnicas da turbina eólica modelo Enercon E70 de 2,0 MW.

Os resultados, quando comparados aos dados do Atlas Eólico Brasileiro (CEPEL, 2001), cuja altura avaliada é de 50 m, indicam diminuição no potencial eólico nos dois cenários de mudança climática considerados, em consequência de menores ocorrências de vento com velocidade superior a 6,0 m/s, o mínimo considerado no estudo como favorável para a produção de energia. Segundo as projeções climáticas, o potencial eólico brasileiro poderá ser em 2100, até 60% menor que o estimado em 2001 para o cenário B2 e até 31% para o cenário A2 (Figura 39). Os resultados apontam também que na região do Nordeste terá ocorrências de ventos médios acima de 8,5 m/s, enquanto que em outras regiões do país a velocidade do vento diminuirá significativamente, resultando em um balanço negativo para essas variações.

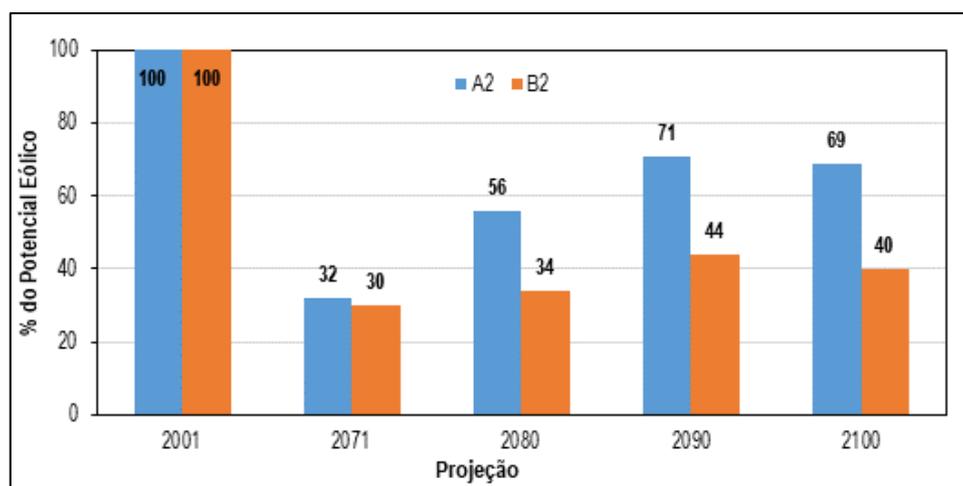


Figura 39 - Projeção do potencial eólico brasileiro – Cenários A2 e B2 do AR4 IPCC.

Fonte: Schaeffer et al. (2008).

Ainda em relação ao estudo apresentado em Schaeffer et al. (2008), deve ser ressaltado que no mesmo não são consideradas projeções na cobertura do solo em função das mudanças climáticas e variáveis antrópicas. Assim, conforme destacado no relatório publicado, alterações na cobertura do solo podem mudar o resultado das projeções climáticas iniciais, uma vez que a rugosidade do solo é uma variável que influencia na velocidade do vento.

Lucena et al. (2010) também analisou os efeitos das mudanças climáticas no potencial eólico do Brasil, conforme apresentado no item 3.2. A simulação do potencial eólico futuro foi baseada nos valores de velocidade média anual do vento a 10 m de altura, fornecidas pelo modelo PRECIS para uma grade de 50 km x 50 km, corrigidas através da regra logarítmica, para uma altura de 50 m. Nas análises não foram incluídas a rugosidade (cobertura do solo) ou os parâmetros de forma e escala da distribuição de Weibull. Também não foi considerado o desvio padrão anual das velocidades de vento fornecidas pelas simulações climáticas, que é um fator importante para estimar a geração de energia eólica de uma determinada capacidade instalada. O estudo considerou ainda a revisão do Mapa do Potencial Eólico brasileiro (CEPEL, 2001), segundo as variações nas velocidades médias do vento projetadas para os cenários A2 e B2 em relação às simulações do *baseline*.

A estimativa do potencial eólico resultou da integração das áreas úteis em um modelo de Sistema de Informação Geográfica (SIG), que cruzou a informação de velocidade de vento com restrições (velocidade de corte de vento, existência de reservas naturais ou rios, lagos e mar) para selecionar as áreas adequadas para geração de energia eólica. A essa primeira estimativa foi assumida a possibilidade de exploração comercial de uma parcela de 20%. O arranjo utilizado no estudo adotou uma taxa de ocupação de 2 MW/km², resultante da aplicação de turbinas de 500 kW. Portanto, a potência instalada em cada ponto da grade foi dada pela seguinte multiplicação: 2 MW/km² x 2.500 km² x 0,2 = 1GW. Assim, o potencial nacional de energia eólica total foi calculado multiplicando esse valor pelo número de áreas adequadas para geração.

Face à disponibilidade de projeções apenas das velocidades do vento, foi necessário assumir que a quantidade de eletricidade produzida pelas turbinas eólicas, dada a velocidade média do vento em cada área, é a mesma ao longo do tempo. Assim, o único parâmetro alterado na função de densidade de probabilidade foi à velocidade média do vento, de modo que o fator de capacidade estimado em para uma dada faixa e região de velocidade do vento é o mesmo ao longo da análise.

Os resultados indicaram que as velocidades médias dos ventos podem aumentar consideravelmente nas regiões costeiras em geral e, particularmente, nas regiões Norte/Nordeste. Quanto ao potencial eólico associado, os resultados baseados nas projeções climáticas mostraram que o potencial de geração de energia eólica no Brasil pode triplicar no cenário B2 e quadruplicar no cenário A2, em relação à situação de referência de 2001 (Figura 40). O trabalho indica ainda um grande potencial para exploração de energia eólica. No entanto, os autores destacam que esses resultados não são determinantes, dadas as incertezas nas projeções climáticas e nas premissas feitas no estudo.

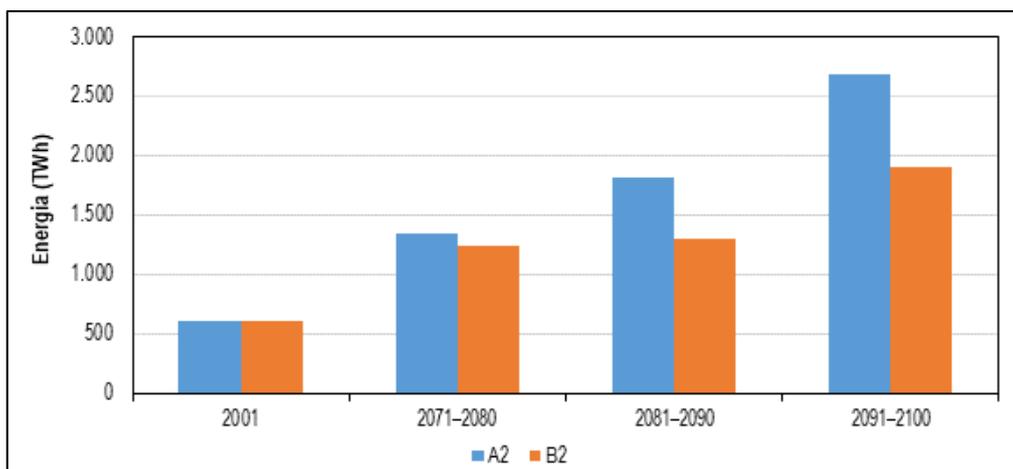


Figura 40 - Potencial de geração de energia eólica no Brasil para os cenários A2 e B2.
Fonte: Lucena et al. (2010).

Pereira et al. (2013) avaliou os impactos das mudanças climáticas na densidade de potência eólica no Brasil, tendo como áreas de avaliação as regiões Nordeste e Sul do país. Foram empregadas projeções de vento obtidas do modelo inglês de circulação global HadCM3. O *downscaling* utilizou o modelo Eta, com resolução de 40 km x 40 km e 38 camadas verticais, sendo atualizado a cada 6 horas com as condições de contorno do modelo HadCM3. O cenário de emissão utilizado foi o A1B do IPCC AR4. Dados observacionais de séries temporais de estações terrestres também foram empregados para validar o modelo Eta-HadCM3 para o período de 1960-1990. Esse período foi considerado como referência (*baseline*) no estudo, sendo comparado com as previsões para os períodos subsequentes (2010-2040, 2040-2070 e 2070-2100).

Na Figura 41 são apresentadas as mudanças relativas nas densidades médias anuais de potência eólica em relação ao período de referência de 1962-1990. Estas parcelas foram avaliadas por Pereira et al. (2013), primeiro calculando a densidade de potência com base nas previsões de velocidade do vento do modelo e, em seguida, calculando a porcentagem de conversão para cada pixel para cada período mostrado. As variações em relação às estações do ano podem ser observadas na Figura 42.

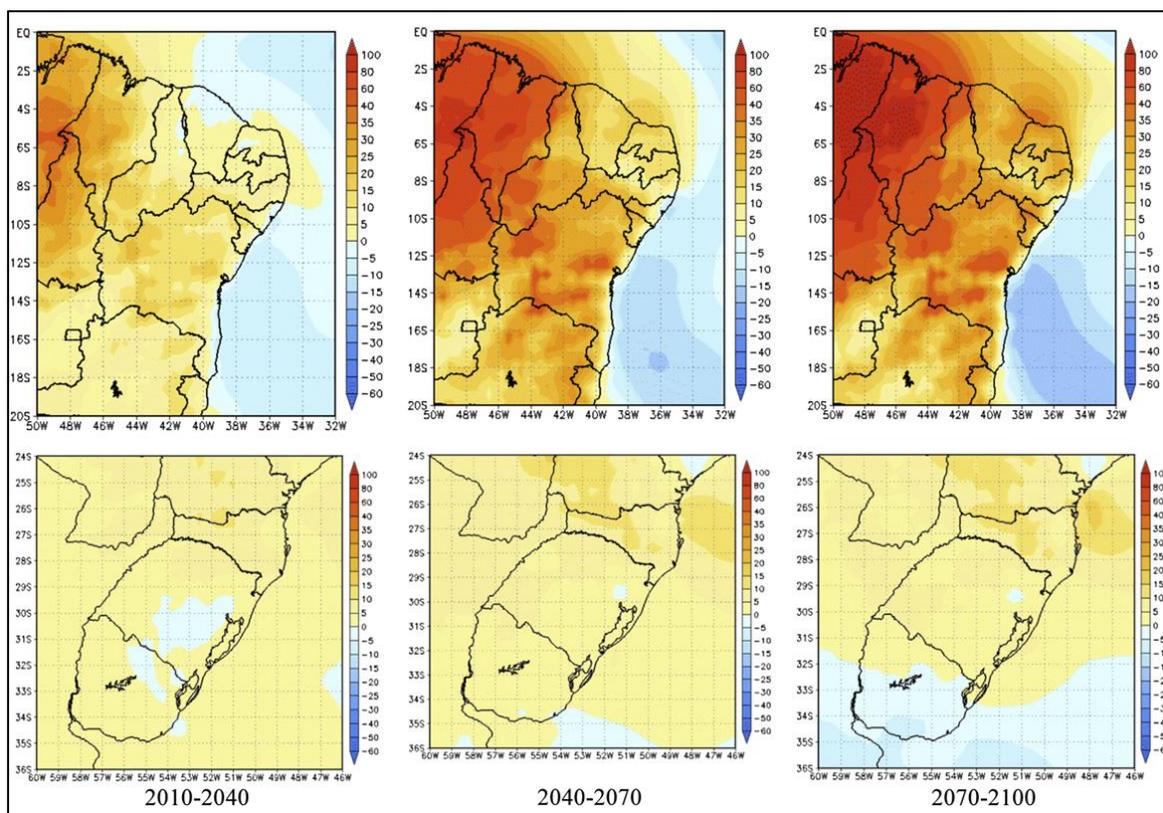


Figura 41 - Médias anuais da variação relativa das projeções do modelo Eta-HadCM3 com relação ao período de referência (1962-1990) para as densidades de potência eólica nas Regiões Nordeste e Sul.

Fonte: Pereira et al. (2013).

Pereira et al. (2013) utilizando projeções regionalizadas do modelo Eta-HadCM3 identificou uma tendência de aumento no final do século XXI superior a 30% na densidade anual de energia eólica (potencial eólico) em grande parte do Nordeste do Brasil, calculado com base nas projeções da velocidade do vento a superfície referente ao cenário A1B (Figura 41 e Figura 42). Em algumas localidades específicas, particularmente o setor norte do Nordeste e a área marítima adjacente, o aumento é superior a 100% em relação ao período *baseline*. Ao longo da costa leste da região, entre os estados da Bahia e Alagoas, as projeções apontam uma tendência de diminuição do potencial eólico em termos anuais e sazonais, excetuando os meses do inverno austral (junho a agosto). A estação do ano que apresenta a maior tendência de aumento da densidade de energia eólica na região nordeste é o outono austral. Na

região Sul do Brasil, também foi identificado aumento anual do potencial eólico, porém de forma menos acentuada em comparação com a região Nordeste, em torno de 10 a 20%. Em termos sazonais, são notados aumentos praticamente o ano todo, excetuando apenas o período de verão (dezembro-fevereiro). Neste período as projeções indicam reduções do potencial eólico da ordem de 5 a 20%.

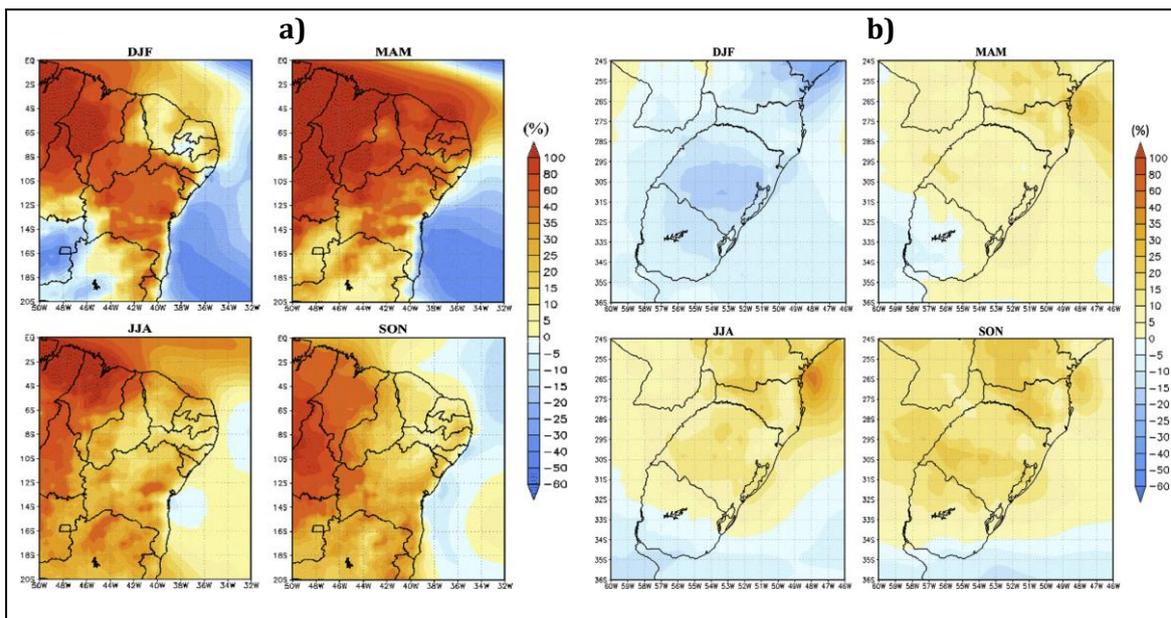


Figura 42 - Variação relativa por estação das previsões do modelo Eta-HadCM3 em relação ao período de referência de 1962-1990 da densidade de energia eólica nas regiões Nordeste (a) e Sul (b) para as previsões para o período de 2070-2100.

Fonte: Pereira et al. (2013).

Com base nestes resultados, os autores apontam que o impacto das mudanças climáticas no potencial eólico nas regiões Nordeste e Sul do Brasil podem ser favoráveis à rentabilidade dos projetos eólicos vigentes e futuros em ambas as regiões. No entanto, os autores destacaram ainda a necessidade de um estudo mais aprofundado a fim de reduzir as incertezas, incluindo séries temporais de dados de observação de um grupo maior de estações terrestres e diferentes cenários para as projeções do modelo global.

Pes et al. (2017) e Pes (2015) abordam os impactos das variações e mudanças climáticas sobre os ventos extremos a 10 m de altura no Brasil. Para isso foram utilizadas séries temporais de velocidade do vento observado de 42 estações pertencentes ao Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), bem como simulações do modelo regional Eta rodado com as condições de contorno do modelo climático inglês HadCM3, compreendendo o período de 1960-1990 e projeções futuras entre 2010 e 2100 para o cenário de emissões A1B, pertencente à família de cenários do IPCC AR4.

De acordo com o estudo de Pes et al. (2015), a análise de tendência das séries de médias mínimas anuais da velocidade do vento observado indicam 50% de tendência não significativa (não há variações na velocidade do vento), 28,5% tendência negativa e 21,4% de tendência positiva (Figura 43a). Já as tendências das médias máximas anuais apresentam 35,7% de tendência não significativa, 19% de tendência negativa e 45,2% de tendência positiva (Figura 43b).

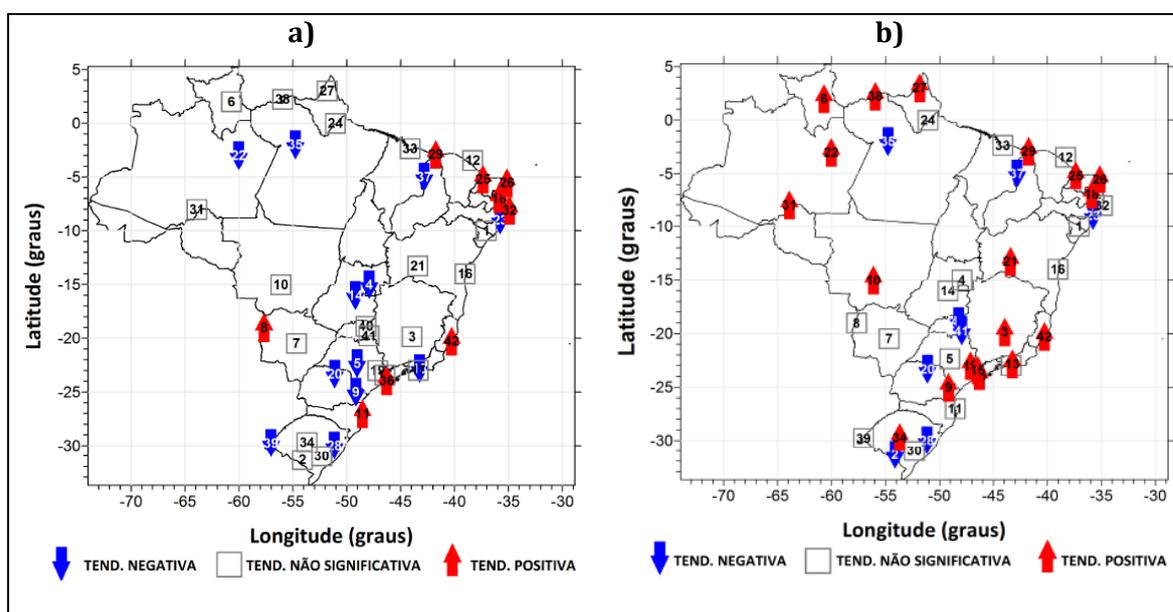


Figura 43 - Distribuição espacial do resultado da análise de tendência para as médias (a) mínimas e (b) máximas na velocidade do vento entre 1947 e 2014.

Fonte: Pes et al. (2015).

No estudo de tendência climática das séries provenientes das projeções do modelo climático, foi realizado o refinamento estatístico das saídas do modelo Eta-HadCM3 com o emprego de Redes Neurais Artificiais (RNAs), as quais foram treinadas tendo como preditores as variáveis de saída do modelo e como alvo as séries de vento observado a 10 m. Os resultados indicam aumento na velocidade mínima do vento ao longo da costa brasileira, principalmente na costa do Nordeste e no interior do continente próximo à costa. Já os máximos de velocidade do vento indicam aumento no interior do continente nas regiões Norte, Centro-Oeste e Sudeste.

Pes et al. (2017) e Pes (2015) não abordaram em seus estudos os efeitos diretos na geração de energia eólica considerando os resultados obtidos.

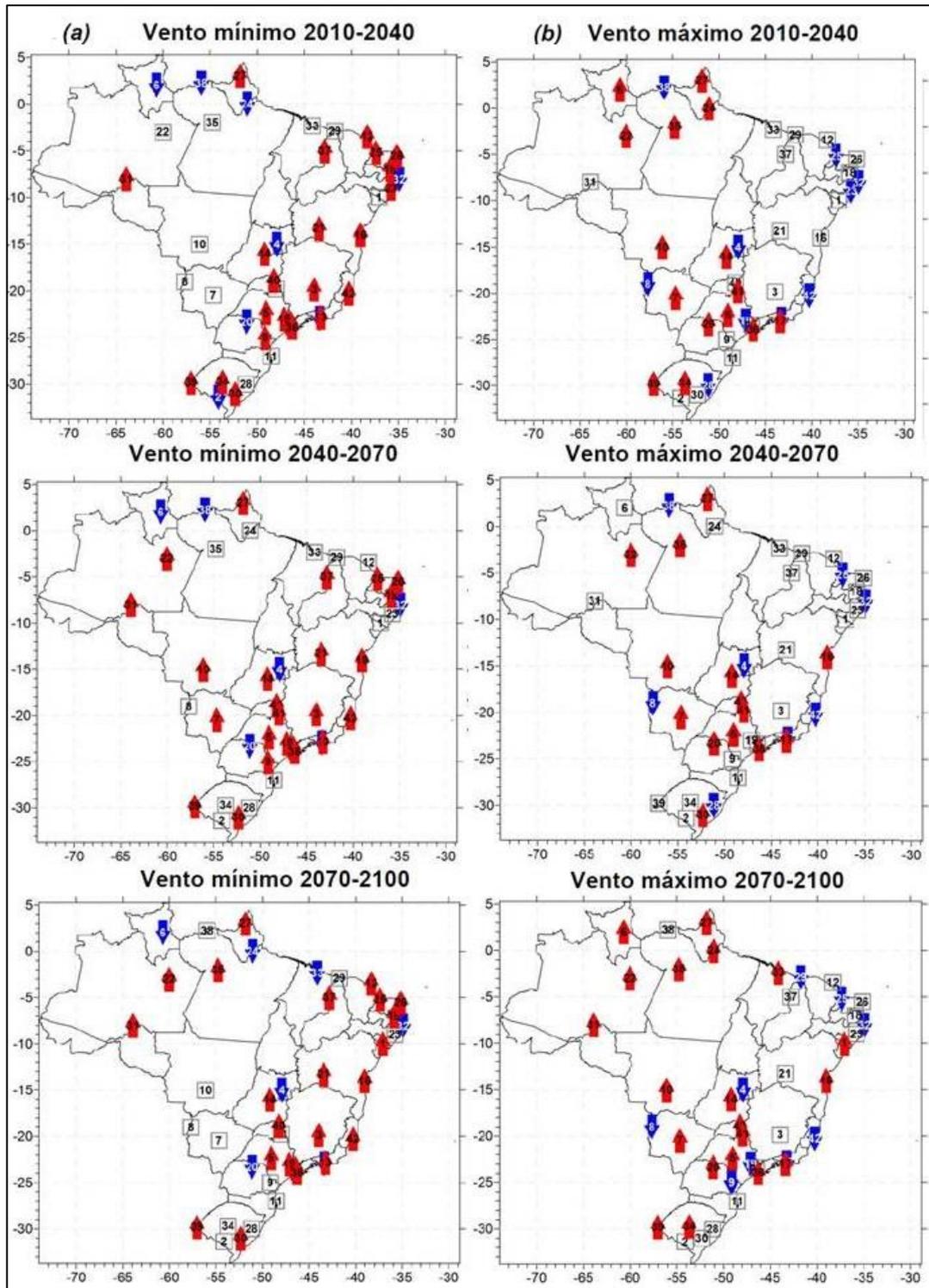


Figura 44- Análise de tendência climática nas séries de velocidade mínima e máxima do vento RNA10m para o período de (a) 2010-2040; (b) 2040- 2070 e (c) 2070-2100.

Fonte: Pes et al. (2015).

Diferente dos estudos anteriores que utilizaram o modelo do AR4, o trabalho de Scherner et al. (2017) intitulado *“Avaliação da Complementaridade das Usinas Hidráulicas e Eólicas Frente às Mudanças Climáticas”* utilizou dois modelos globais mais atualizados do AR5 (IPCC, 2014). A ideia do trabalho foi analisar, além do comportamento do vento para os períodos futuros, a complementaridade entre precipitação e vento. Isso é importante principalmente na região Nordeste, onde existe hoje uma complementaridade significativa entre estas duas fontes. A seguir, é descrito o trabalho com as premissas e resultados obtidos.

Com o intuito de analisar o comportamento do vento e seu reflexo na geração eólica o estudo de Scherner et al. (2017) utilizou o modelo regional Eta forçado pelas condições dos modelos globais HadGEM2-ES e MIROC5, considerando o cenário RCP8.5. Dando origem as projeções: ETA-HadGEM2-ES 8.5 e ETA-MIROC5 8.5. Entretanto, para validar o modelo regional, foi simulado também, o período histórico, portanto, foram utilizados dois períodos: o histórico (1961-1990) e o futuro (2011 - 2100). E a partir da listagem de empreendimentos de geração eólica vencedores do Leilão de Energia Reserva (LER), Leilões de Energia Nova (LEN), Leilões de Fontes Alternativas (LFA), PROINFA além de parques eólicos em que a energia é comercializada no Ambiente de Contratação Livre (ACL), foram feitas projeções de velocidade do vento e vazão d’água. Sendo assim, Scherner et al. (2017) escolheu as cidades de Amontada (CE), Aracati (CE), Caetité (BA), Morro do Chapéu (BA), Currais Novos (RN), João Câmara (RN), Coxilha Negra (RS) e Estrada Senandes (RS).

Segundo Scherner et al. (2017), para os dados de vazões d’água foram utilizadas vazões das usinas hidrelétricas mais próximas das regiões em que foram extraídos os dados de velocidade do vento, sendo estas: duas usinas localizadas na bacia do rio São Francisco, região nordeste do Brasil; as usinas do Complexo Paulo Afonso e Sobradinho e; duas usinas na região sul Brasil, as usinas de Dona Francisca (bacia do rio Jacuí) e Castro Alves (bacia do rio Taquari-Antas). Também foram utilizadas as projeções ETA-HadGEMs-ES 8.5 e ETA-MIROC5 8.5 para as médias diárias da velocidade do vento medidas para 10 metros de altura em relação ao solo. Ajustes foram realizados para

adequar à altura dos empreendimentos eólicos que chegam de 100 a 150 metros. Com os dados históricos e futuros dos modelos climáticos já extrapolados, Scherner et al. (2017) realizou ajustes nos dados das projeções climáticas através da metodologia "Delta Change", pois a simulação histórica dos modelos climáticos não consegue representar perfeitamente o clima atual e seus resultados apresentam alguns vieses. Portanto, utilizou-se o histórico do modelo VORTEX, modelo atmosférico de Mesoescala on-line que fornece velocidades de vento estimadas para locais onde não existem medições de longo período, para ajuste nos dados dos modelos climáticos.

A Figura 45 traz como exemplo uma série de vento antes e depois da aplicação do método *Delta Change*. A linha em azul representa os dados não ajustados e a linha vermelha os dados após o ajuste de viés. Observa-se um delta positivo após o ajuste, mostrando a relevância da correção, para que as simulações dos modelos climáticos se assemelhem com os dados observados (SCHERNER et al., 2017).

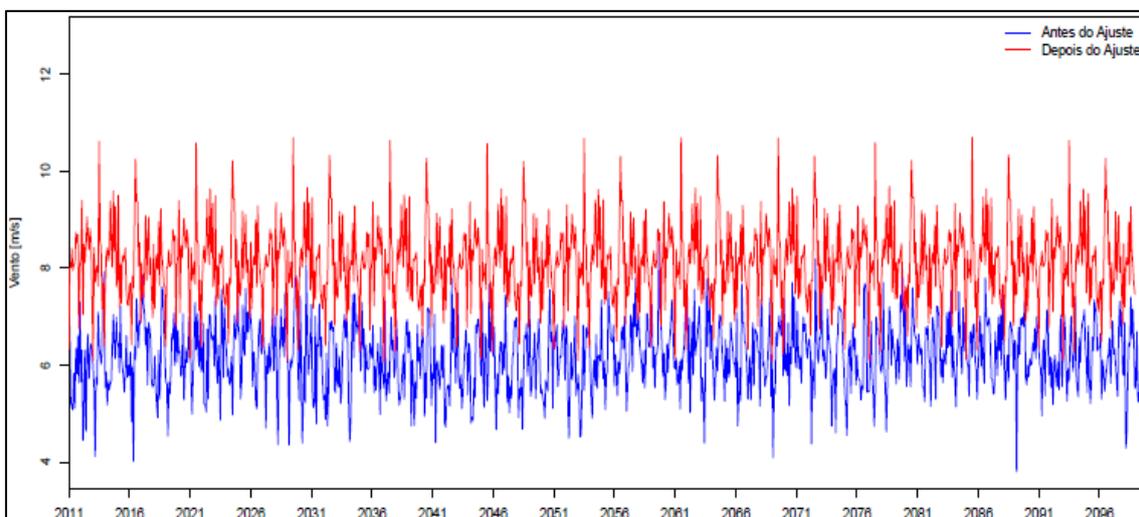


Figura 45 - Aplicação da Taxa de Câmbio nos dados dos modelos climáticos.

Fonte: Scherner et al. (2017).

Para as séries de vazões históricas das usinas hidrelétricas (UHes) Scherner et al. (2017) utilizou as vazões registradas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e para as vazões futuras os resultados obtidos pelo modelo MGB-IPH, o qual utilizou dados dos modelos climáticos.

Para a análise estatística, Scherner et al. (2017) utilizou a distribuição de Weibull para representar o vento e, o coeficiente de Pearson, para avaliar as correlações existentes entre vento e vazões. A partir da existência das correlações, o trabalho de Scherner et al. (2017), aplicou metodologia similar, às projeções futuras das variáveis climáticas para verificar se o comportamento atual iria sofrer alterações. Verificou-se inicialmente que as usinas eólicas do Nordeste têm forte correlação entre si assim como as usinas da Região Sul. Com este resultado inicial, para simplificar as análises selecionaram três pontos na região Nordeste e um ponto na região Sul: Amontada - CE, Morro do Chapéu - BA, Currais Novos - RN e Coxilha Negra - RS. Devido às semelhanças do vento nas projeções do cenário RCP8.5 oriundas do modelo Eta aninhadas aos dois modelos globais, os autores optaram por detalhar apenas as simulações ETA-HadGEMs-ES 8.5.

Scherner et al. (2017) conclui que foi observada uma melhoria na intensidade dos ventos na região Nordeste e a permanência da correlação negativa entre eólicas e hidrelétricas nesta região, mas com menor intensidade. No que se refere às hidráulicas, verificou geração menos expressivas. Dessa forma, o aumento da velocidade dos ventos em épocas de baixas afluências, além de auxiliar no atendimento da carga, reduz o custo da geração elétrica, através da diminuição do acionamento de fontes termoeletricas. Esta complementaridade e sua evolução são importantes para dimensionamento de recursos como energia de reserva que comumente são ou deveriam ser providas por fontes não intermitentes como a geração termelétrica (SCHERNER et al., 2017). A região sul apresentou o enfraquecimento da correlação positiva, entre as fontes hídricas e eólicas, para os períodos futuros, entretanto, ainda manteve seu comportamento de agregador de geração, que faz com que o parque gerador desta região auxilie no atendimento da demanda das demais regiões do Brasil, assumindo um papel de exportador de energia no período de altas afluências e alta velocidade de vento (SCHERNER et al., 2017).

Reboita et al. (2018) a partir das simulações do modelo RegCM4 aninhadas aos modelos globais MPI-ESM-MR, GFDL-ESM2M e HadGEM2-ES, considerando o cenário

RCP8.5, avaliou também a densidade de energia eólica, a qual corresponde o número de Watts de energia elétrica produzida por metro quadrado de espaço aéreo (MANWELL et al., 2010) e indica áreas com alto e baixo potencial para a implantação de parques eólicos (REBOITA et al., 2018). Os resultados, mostrados através das diferenças percentuais entre o futuro próximo (2020-2050) e distante (2070-2098) em relação ao período *baseline* (1970-2050), indicam que o Nordeste do Brasil continuará a ser um bom local para os parques eólicos, com aumento de cerca de 40% a longo prazo, podendo chegar a mais de 100% nos meses de outono (Figura 46).

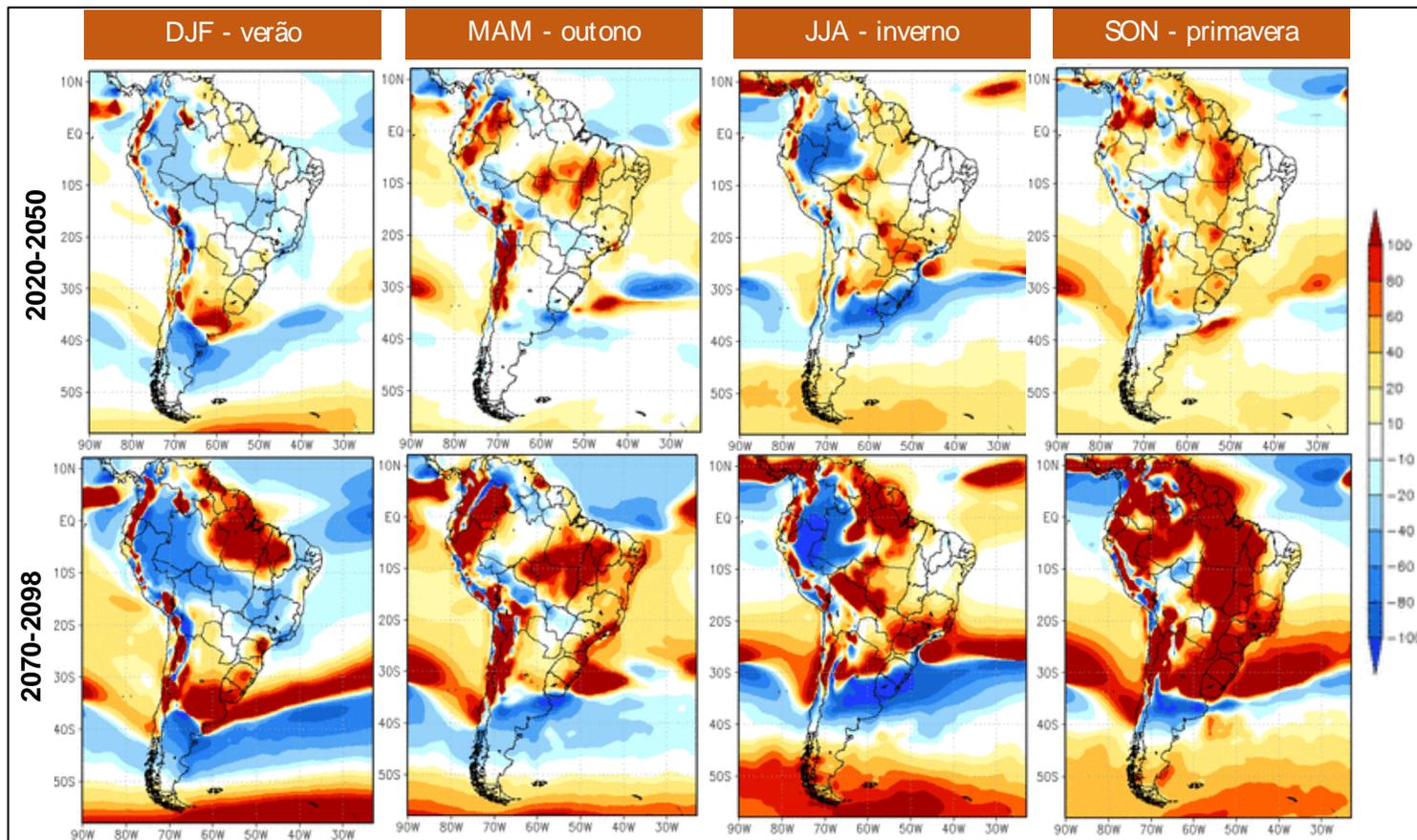


Figura 46 - Mudanças projetadas do potencial eólico (%) com base nas simulações do modelo RegCM4 aninhado as saídas dos modelos globais MPI-ESM-MR, GFDL-ESM2M e HadGEM2-ES, considerando o cenário RCP8.5.

Fonte: Adaptado de Reboita et al. (2018).

O aumento do potencial eólico brasileiro em projeções do clima futuro a partir dos cenários RCPs (REBOITA et al., 2018; SCHERNER et al., 2017) estão consistentes com as projeções anteriores dos cenários SRES (PEREIRA et al., 2013; LUCENA et al., 2010; EICHELBERGR et al., 2008). Apesar das diferenças ferramentais e metodológicas, os resultados convergem e indicam que as áreas com parques eólicos em todo o Brasil devem continuar propícios à geração de energia eólica. Todavia, tais resultados não eliminam a necessidade de estudos mais aprofundados sobre o tema com intuito de conhecer e/ou diminuir as incertezas associadas tanto aos modelos numéricos usados quanto os cenários de emissões dos GEE.

5.2.2 Contextualização para a bacia do rio São Francisco

Na região da Bacia do rio São Francisco, segundo os dados mais recentes do BIG (ANEEL, 2018), existem cerca de 180 usinas eólicas em operação, que totalizam 4,7 GW de capacidade instalada, que representam cerca de 35% do total instalado de geração eólica no país e, para o futuro, estão previstos mais 167 empreendimentos que somam 3,8 GW, que por sua vez, representam cerca de 70% do total previsto para a fonte. Outros projetos localizados na região e cadastrados na ANEEL com DRO atingem 11 GW de capacidade instalada. Esses dados evidenciam a importância da região no contexto do planejamento do setor elétrico, também para a geração eólica.

Na Figura 47 e na Figura 48 é mostrada a localização dos projetos sobreposta ao mapeamento do potencial eólico realizado pelo CEPEL (2017) para uma altura de 100 m.

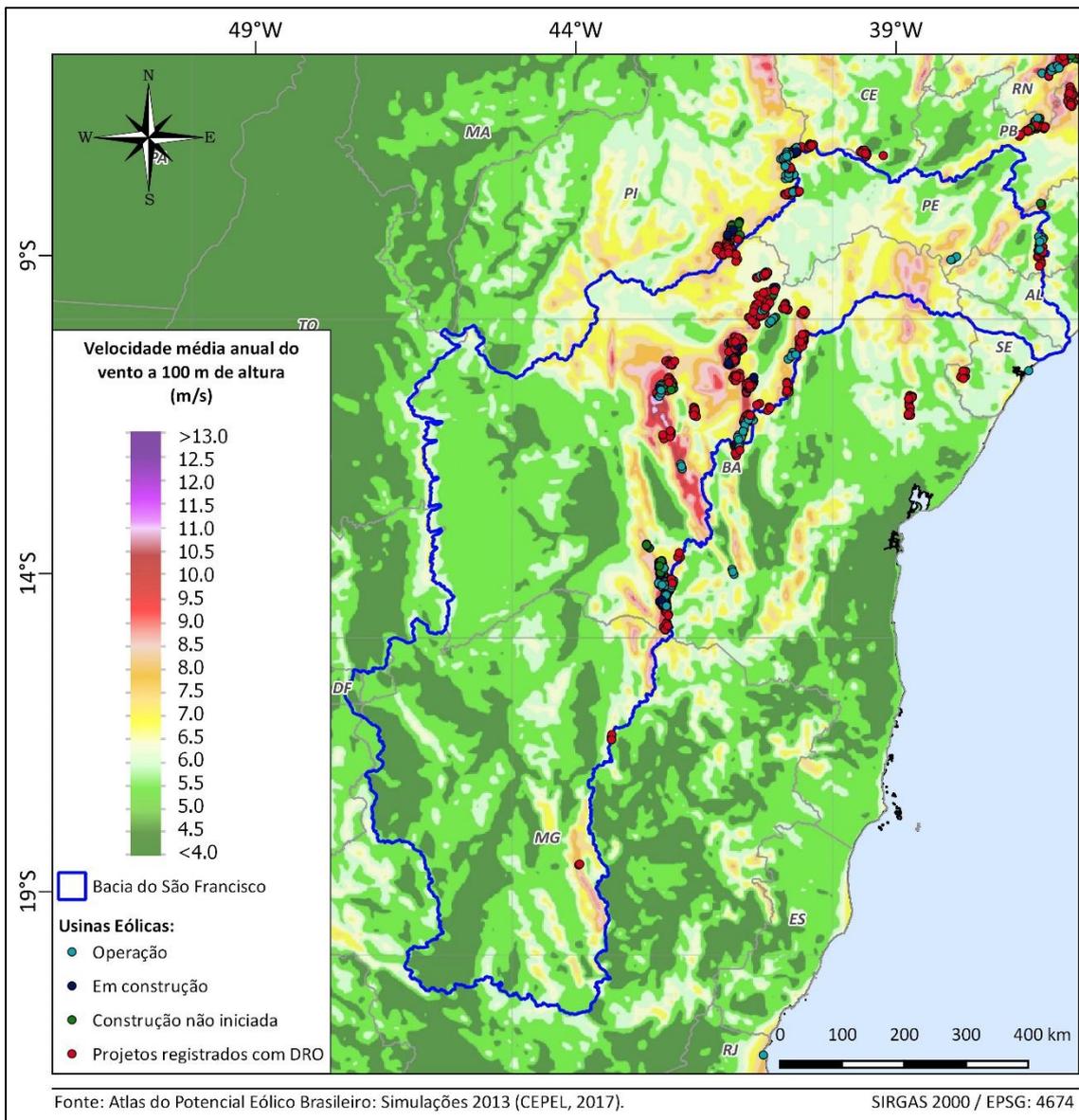


Figura 47 - Velocidade Média Anual para uma altura de 100m na Bacia do Rio São Francisco.

Fonte: ANEEL (2018), CEPEL (2017).

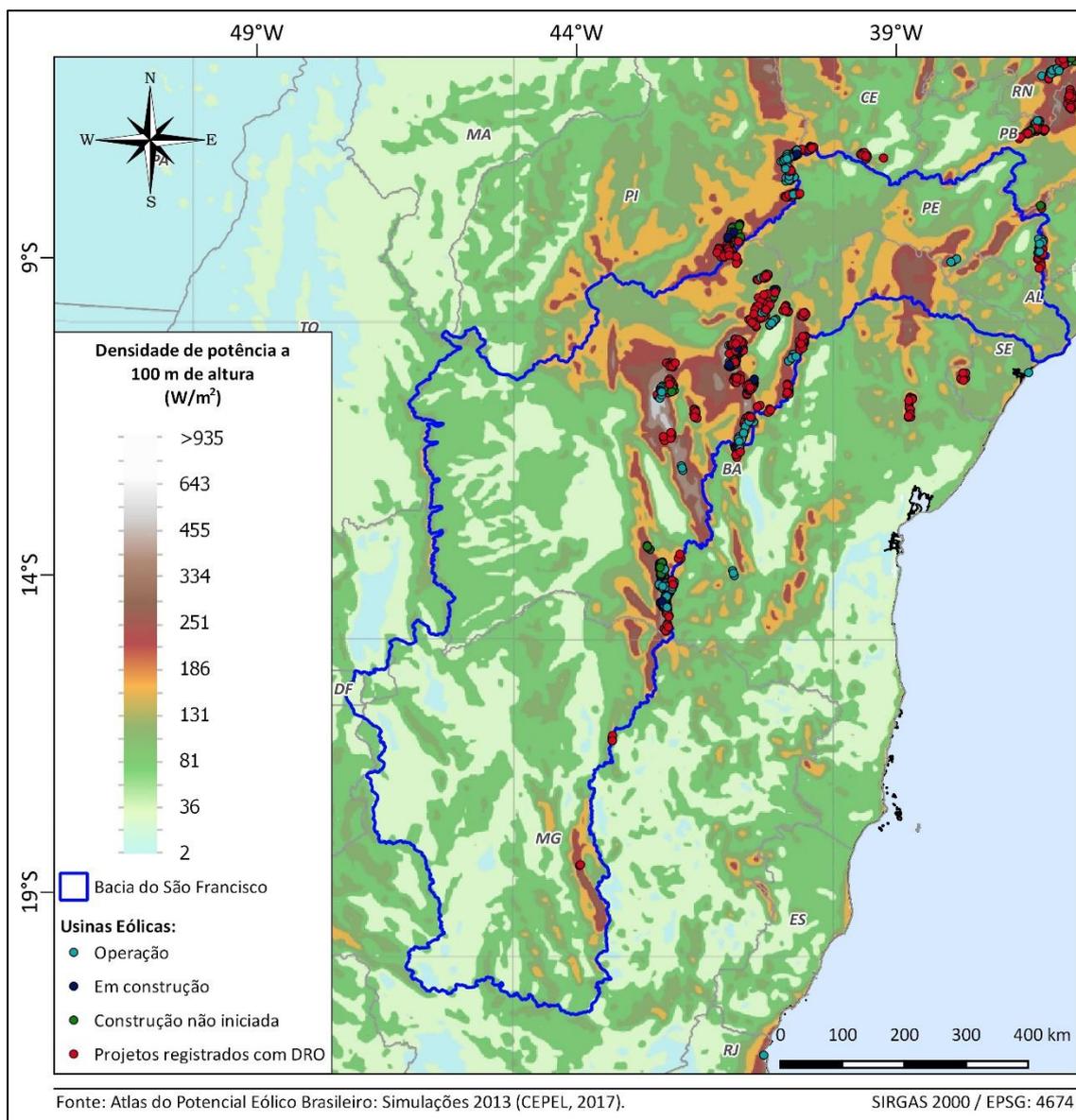


Figura 48 - Potencial Eólico atual para a Bacia do rio São Francisco a uma altura de 100 m.

Fonte: ANEEL (2018), CEPEL (2017).

A região da Bacia do rio São Francisco sob a análise dos resultados obtidos pelo estudo apresentado em Schaeffer et al. (2008), sofre redução de potencial eólico ao longo das projeções, sendo o cenário B2 avaliado como o mais crítico.

Já em ambos os cenários de emissões avaliados por Lucena et al. (2010), a região na qual está inserida a bacia apresentará variações positivas na velocidade do vento,

possuindo maiores intensidades nos trechos pertencentes ao estado da Bahia e próximos aos estados do litoral. Em termos de avaliação energética, não é possível observar um resultado específico para a bacia, uma vez que o potencial é avaliado para a região Nordeste como um todo.

Nos resultados obtidos por Pereira et al. (2013), é indicado o aumento da densidade de potência média anual ao longo de toda a extensão da bacia, com magnitudes próximas de 10% no período de 2010-2040. Nos períodos posteriores (2040-2070 e 2070-2100), poderão ocorrer maiores incrementos na região localizada próxima à divisa dos estados da Bahia e Piauí, atingindo cerca de 30% de variação positiva. Quanto ao comportamento sazonal, as maiores tendências de aumento da densidade de potência são apresentadas no verão e outono, particularmente na região norte do estado da Bahia.

No trabalho de Pes et al. (2015) os resultados indicam tendência de aumento na velocidade mínima de vento para os períodos de 2010-2040, 2040-2070 e 2070-2100, quando observadas as localizações das estações 3 e 21 na região da Bacia do Rio São Francisco (Figura 44). No caso da velocidade máxima de vento, os resultados na bacia apresentam tendência não significativa.

Scherner et al. (2017) nos seus estudos conclui que para o Nordeste do Brasil, região que engloba parte da bacia do Rio São Francisco, permanecerá a correlação negativa entre eólicas e hidrelétricas para os períodos de 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2099.

Reboita et al. (2018), considerando o cenário RCP8.5, indica que a região onde está inserida a Bacia do Rio São Francisco continuará a ser um bom local para os parques eólicos, com aumentos no potencial eólico de até 40% a longo prazo (2070-2098), nos meses de outono. Já para os meses de verão se verificam reduções de até 20% no potencial, para o mesmo período.

5.3 Geração solar

De acordo com a CRESESB (2017), anualmente, a atmosfera terrestre, recebe do Sol 1,5 x 1.018 kWh de energia, valor que corresponde a 10.000 vezes o consumo mundial de

energia para este período. Dessa forma, além de ser responsável pela manutenção da vida na Terra, a radiação solar constitui-se numa fonte energética inesgotável, apresentando um grande potencial de utilização por meio de sistemas de captação e conversão em outra forma de energia, como por exemplo, a térmica e a elétrica.

A radiação solar que atinge à superfície terrestre e incide sobre uma superfície receptora, é constituída pelas componentes direta e difusa, como pode ser visto na Figura 49. Segundo Pinho e Galdino (2014), a radiação direta vem diretamente da direção do Sol e produz sombras nítidas, enquanto que a difusa é a radiação proveniente de todas as direções e que atinge a superfície após sofrer espalhamento pela atmosfera terrestre. A radiação refletida pelo ambiente é determinada pelo coeficiente de reflexão da superfície refletora, chamado de albedo (RIBEIRO, 2017). Em dias onde não há presença de nuvens, pelo menos 20% de radiação que atinge a superfície é difusa, enquanto que em dias totalmente nublados, esta porcentagem vai para 100%, portanto, nestes dias não há a radiação direta (PINHO; GALDINO, 2014).

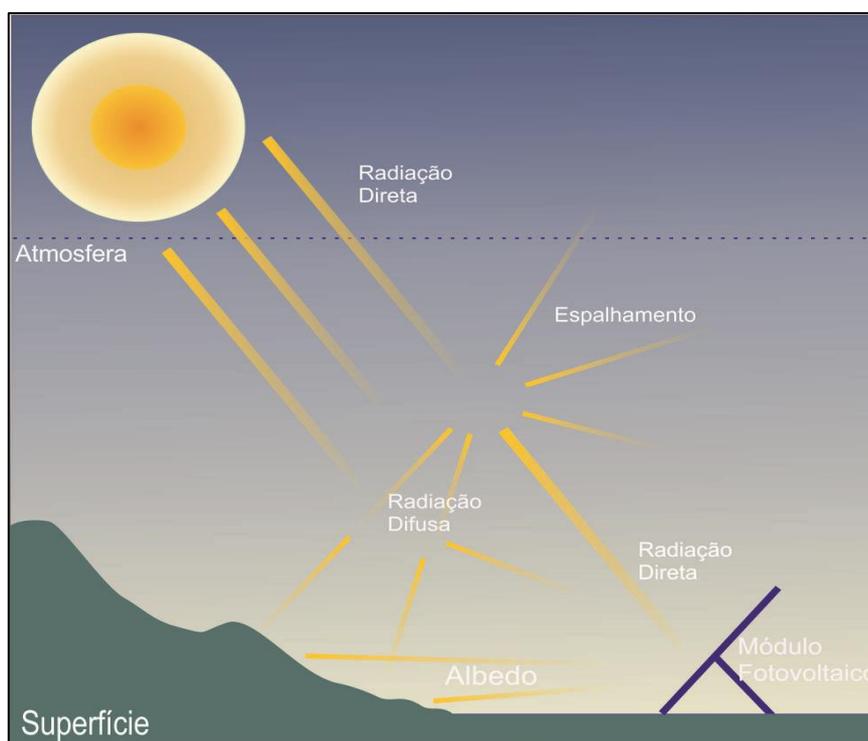


Figura 49 - Componentes da radiação solar.

Fonte: Ribeiro (2017).

A energia recebida pela superfície terrestre através da irradiação solar é utilizada para geração de energia elétrica diretamente através de sistemas fotovoltaicos ou através da energia térmica concentrada, normalmente no foco de um conjunto de espelhos denominado de energia termosolar.

Segundo Ribeiro (2017), a partir de conceitos geométricos, é realizada a análise dos raios solares incidentes na superfície terrestre, o que auxilia os projetos que tenham em vista o aproveitamento da energia solar. Em princípio, para a determinação dos ângulos, são empregados os planos e os eixos de referências conforme mostrado na Figura 50.

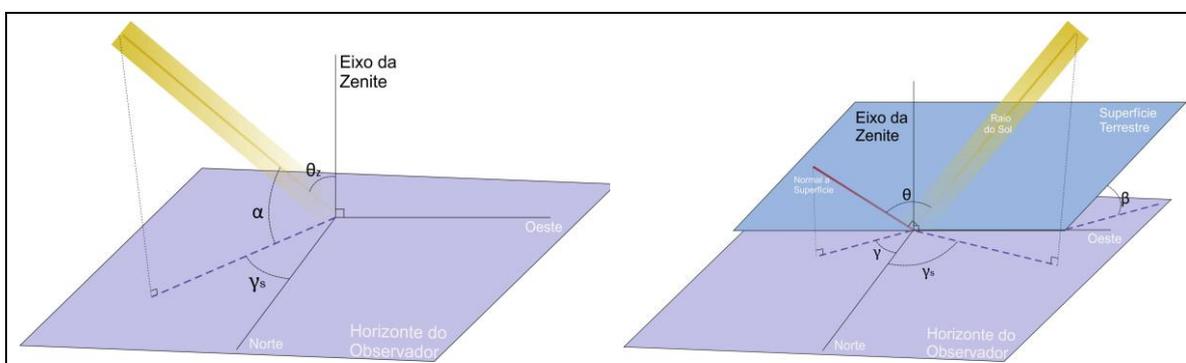


Figura 50 - Plano do Horizonte do Observador (à esquerda) e Plano referente à superfície terrestre (à direita).

Fonte: Ribeiro (2017).

Ainda segundo Ribeiro (2017), o posicionamento e a instalação adequada dos módulos fotovoltaicos, ou de placas solares, visando o máximo aproveitamento da energia incidente, são determinados pelos ângulos solares e o potencial energético solar possui dependência do período de tempo no qual os raios solares incidem em uma superfície. Para isso, são adotados dois planos de referência:

- O plano do horizonte do observador, o qual apresenta os eixos que indicam as direções geográficas e o eixo de Zênite, que está perpendicular ao plano do horizonte observador (Figura 50 à esquerda);
- À superfície terrestre que está inclinada do plano do horizonte do observador de um ângulo β (Figura 50 à direita).

Os ângulos formados entre os dois planos e os eixos são:

- θ_z : ângulo formado entre o raio solar e o eixo de Zênite;
- α : Ângulo entre o raio solar e a sua projeção no plano do horizonte do observador;
- O ângulo da Zênite e o ângulo solar são complementares;
- γ_s : Ângulo Azimutal do sol é o ângulo entre a projeção do raio solar no plano do horizonte do observador e o eixo de direção Norte;
- γ : Ângulo Azimutal da superfície é o ângulo entre a projeção da normal da superfície no plano do horizonte do observador e o eixo Norte;
- θ : Ângulo de incidência é o ângulo formado entre o raio solar e a norma do plano da superfície.

Nos últimos anos, o uso de tecnologias de conversão de energia solar vem crescendo mundialmente (PEREIRA et al., 2017). Entre 2010 e 2016, a capacidade instalada global por sistemas fotovoltaicos, por exemplo, os quais convertem energia direta do sol em energia elétrica, cresceu em média 40% contra 16% da eólica e aproximadamente 3% da hídrica (REN21, 2017). No Brasil, o aproveitamento do recurso solar configura-se como uma excelente opção para complementação de fontes convencionais consolidadas, como, por exemplo, as hidroelétricas (PEREIRA et al., 2017). O aproveitamento do recurso solar pode favorecer o controle hídrico nos reservatórios, principalmente nos períodos de menor ocorrência de chuvas e possibilitar planejamento e otimização de novos investimentos em geração, transmissão e distribuição da energia (PEREIRA et al., 2017). De acordo com Pereira et al. (2017), a irradiação global anual tem aumentado em todas as regiões brasileiras a uma taxa de 10 a 20Wh/m² por ano, com exceção apenas da região Sul (Figura 51).

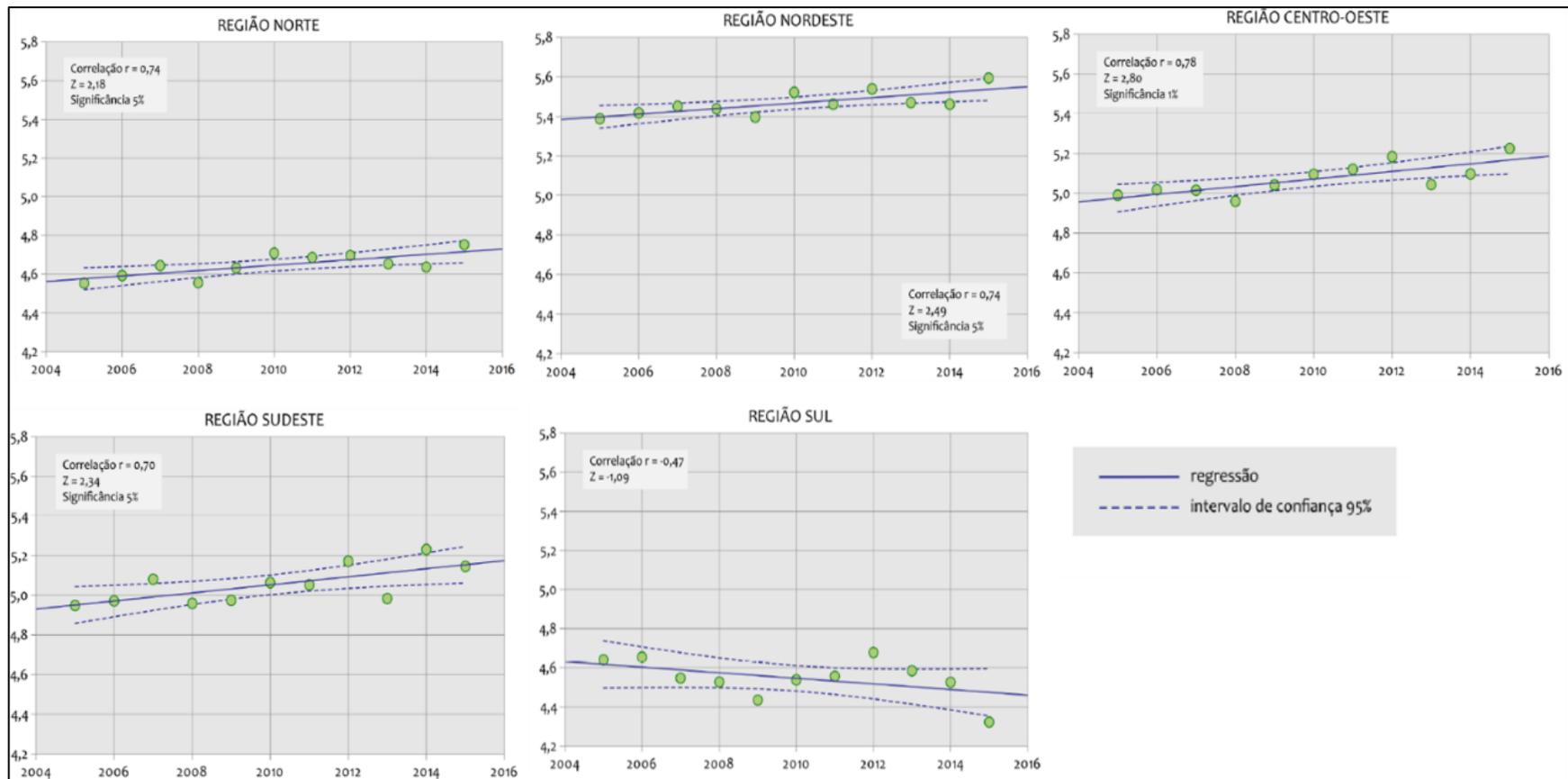


Figura 51 - Análise de tendência pelo método de Mann-Kendall aplicada às médias anuais do total diário de irradiação global horizontal (kWh/m²) nas cinco regiões do Brasil.

Fonte: Pereira et al. (2017).

Ainda com relação a energia solar brasileira, a ANEEL informa que há uma potência instalada de 1.307 MW, o que representa 0,78% da potência instalada de energia elétrica no Brasil. Os maiores potenciais solares em operação são encontrados nos estados da Bahia, Minas Gerais e Piauí (Figura 52).

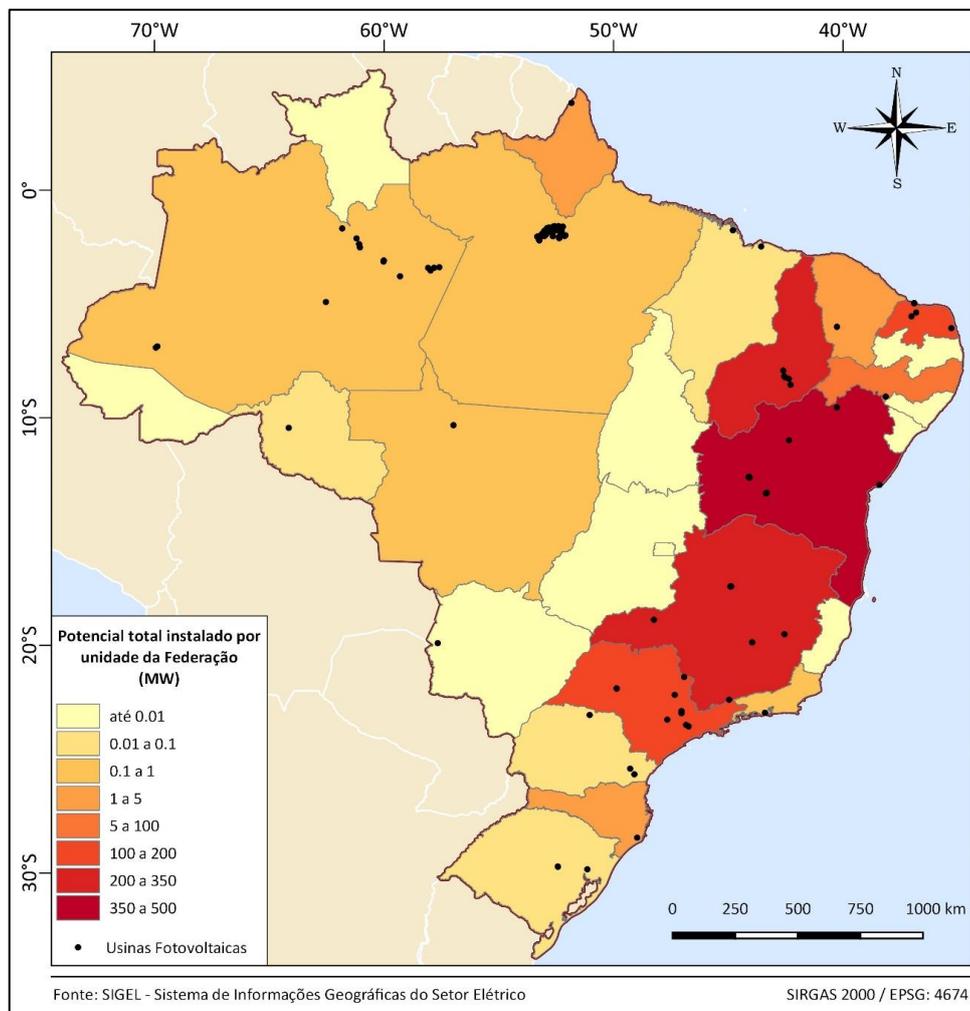


Figura 52 - Potencial total instalado solar por unidade da federação (MW) e usinas fotovoltaicas em operação.

Fonte: Dados do SIGEL (2018).

Segundo a MME (2015), a região nordeste do Brasil apresenta as melhores condições para a geração de energia solar, uma vez que apresenta os maiores valores de irradiação solar global, com a maior média e a menor variabilidade anual entre todas as regiões geográficas, conforme apontado na Figura 51 e na Figura 53. Durante todo o

ano, há condições climáticas que conferem um regime estável de baixa nebulosidade e alta incidência de irradiação solar para o Nordeste (MME, 2015).

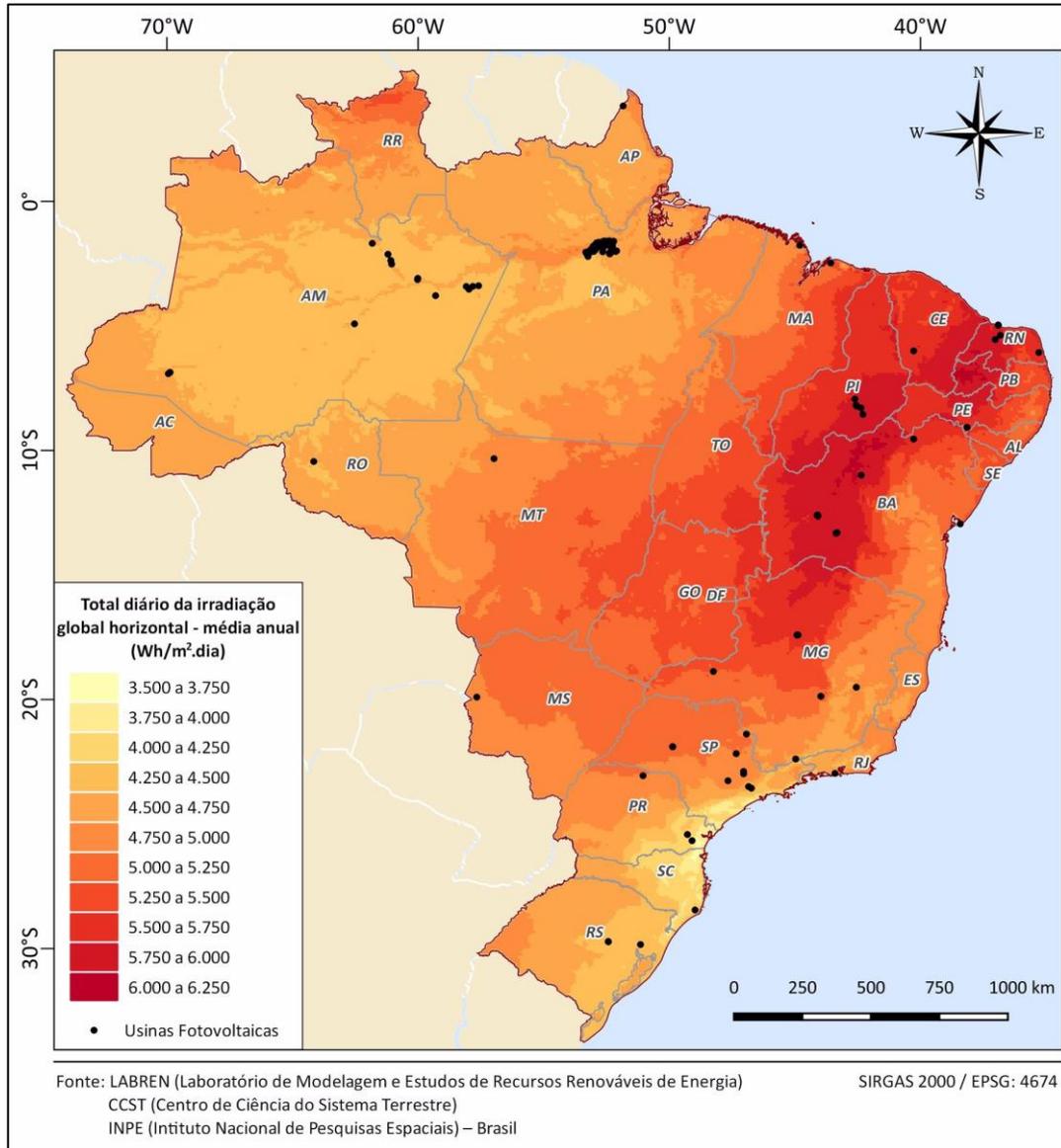


Figura 53 - Total diário da irradiação global horizontal – média anual.
Fonte: Dados do LABREN/CCST/ INPE- Brasil (2017).

Ribeiro (2017) analisou o possível impacto do aquecimento global na geração de energia elétrica advinda de fonte solar, utilizando o exemplo da geração fotovoltaica colocada em telhados residenciais. Este estudo utilizou as projeções de radiação solar global estimados pelos modelos climáticos globais MIROC e HadGEM, com o cenário

RCP4.5, projetados para dois períodos futuros: de 2007 a 2040 e de 2041 até 2070. Para o período de 2007 a 2040, o modelo MIROC utilizando o cenário RCP4.5, apresentou maiores reduções nos meses de verão e início do outono, principalmente nas capitais São Luiz e Terezina (Figura 54). Salvador foi a capital que apresentou menores variações médias mensais diárias, oscilando durante o ano, entre 0,5% e 3,2% (Figura 54). Os meses de inverno e começo da primavera, onde a radiação solar apresenta menores índices, as variações foram menores que 3%.

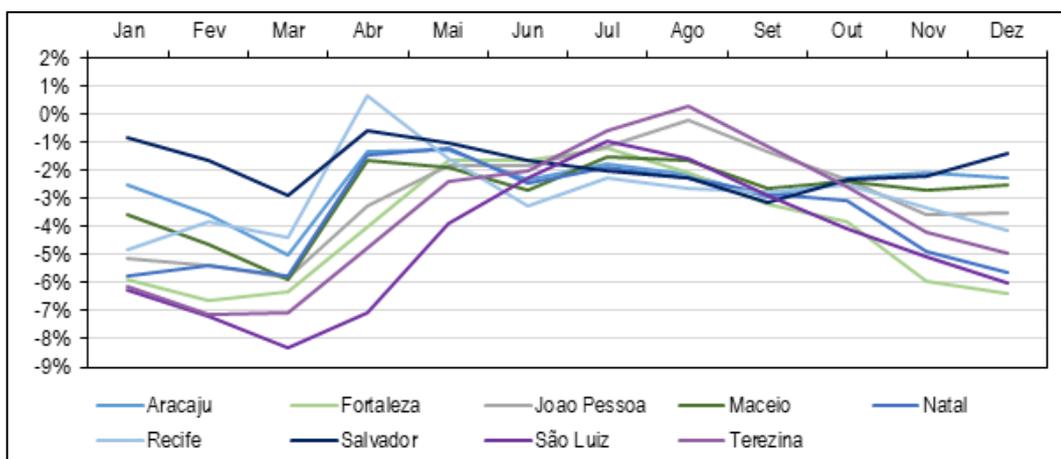


Figura 54 - Variação das médias mensais diárias de radiação solar para cenário RCP4.5 com o Modelo MIROC, para o período de 2007 a 2040.

Fonte: Ribeiro (2017).

Na Figura 54 e Figura 55 verifica-se que em geral há projeção de uma leve redução de radiação nas 9 capitais do Nordeste para os períodos futuros simulados. Tendo em vista que na região Nordeste do Brasil está sendo instalada grande quantidade de geração eólica, sistemas híbridos solar-eólicos podem ser uma alternativa bastante atrativa, dado o nível já observado atualmente (RIBEIRO, 2017).

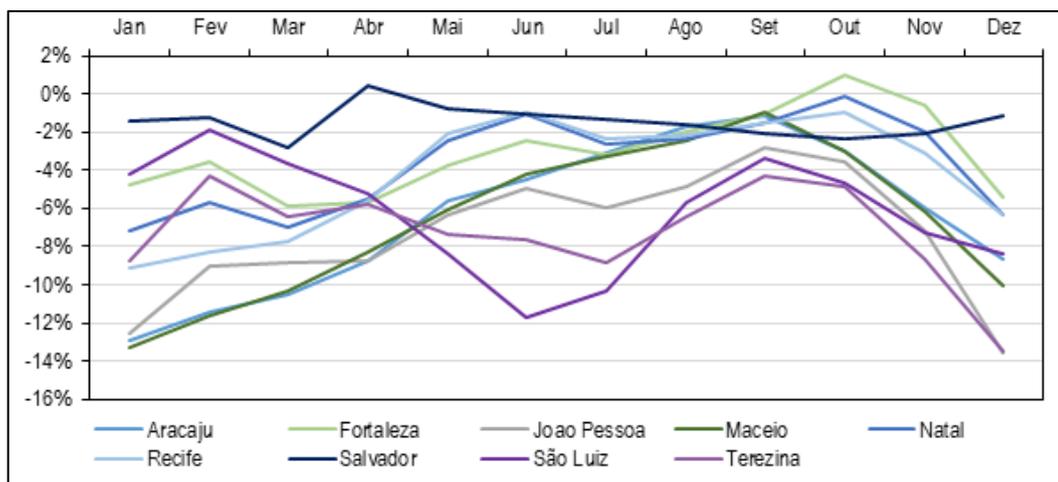


Figura 55 - Variação das médias mensais diárias de radiação solar para cenário RCP4.5 com o Modelo HadGEM, para o período de 2041 a 2070.

Fonte: Ribeiro (2017).

Já Oscar Júnior et al. (2015) avaliou projeções de indicadores da disponibilidade do recurso solar para produção de energia em cenários de mudanças climáticas. Os autores utilizaram projeções do cenário RCP8.5 regionalizadas pelo modelo Eta aninhando ao modelo global MIROC5. O indicador de energia solar foi calculado com base na radiação solar incidente e nas componentes do balanço de radiação, denominado como indicador de radiação útil ($Wh/m^2.dia$). Os resultados indicam que o Brasil, corroborando aos achados de Pereira et al. (2017), possui grande área e valores expressivos para uso do recurso solar, tanto nos dias atuais quanto nas próximas décadas, especialmente no Norte, Nordeste e Centro-Oeste (Figura 56).

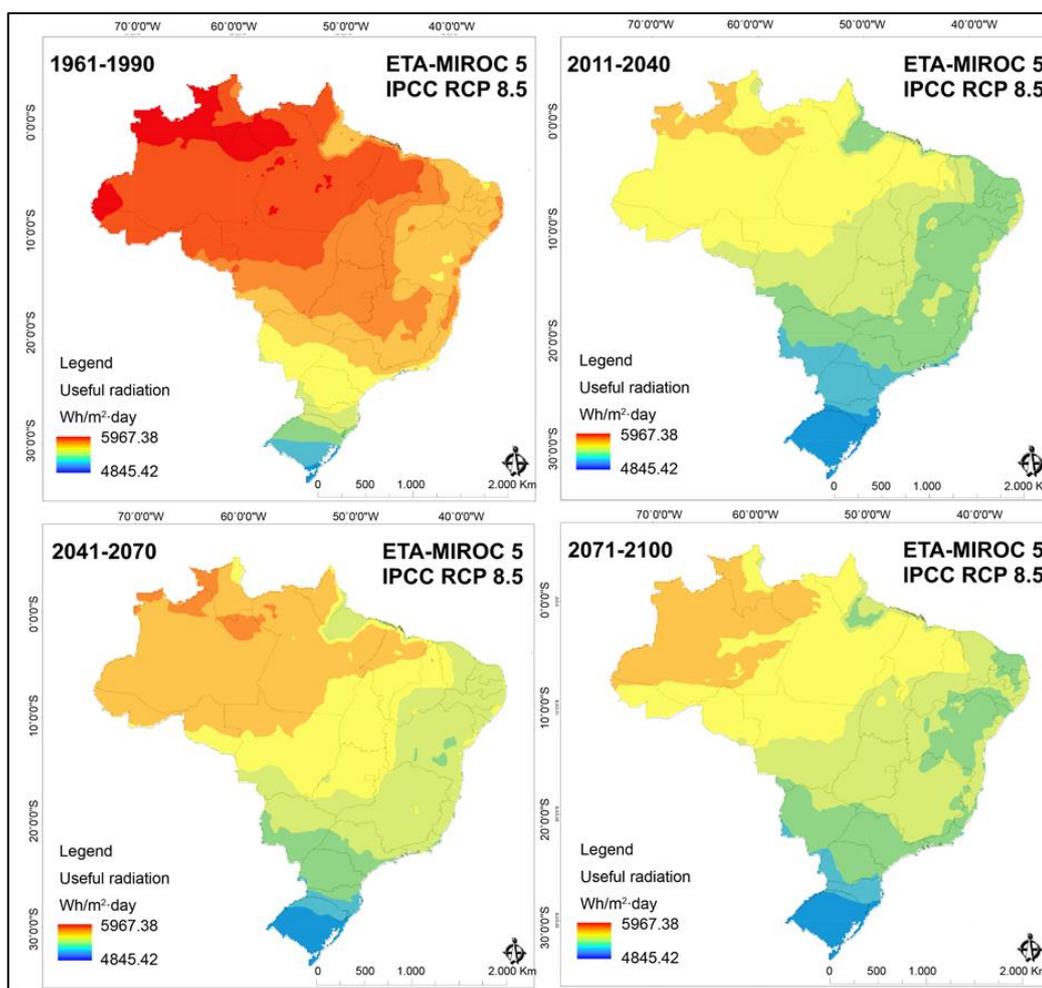


Figura 56 - Valores médio do indicador da radiação útil para simulações do clima presente (1961-1990) e projeções do cenário RCP8.5 para 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100 geradas através do modelo Eta-MIROC5.

Fonte: Oscar Júnior et al. (2015).

As projeções indicam redução da radiação útil entre 4% e 8% ao longo do século XXI, valores considerados não significativos, uma vez que o país ainda encontra dentro de um intervalo adequado para a geração de energia a partir do recurso solar (OSCAR JÚNIOR et al., 2015).

De acordo com a Figura 57, os maiores potenciais de geração fotovoltaica em residências estão nas regiões mais povoadas do país. Isso se deve ao fato de estados como São Paulo e Rio de Janeiro, com valores menores de irradiação, serem

compensados pelo grande número de residências e, assim, apresentam maior área de telhados disponível para instalação de placas solares.

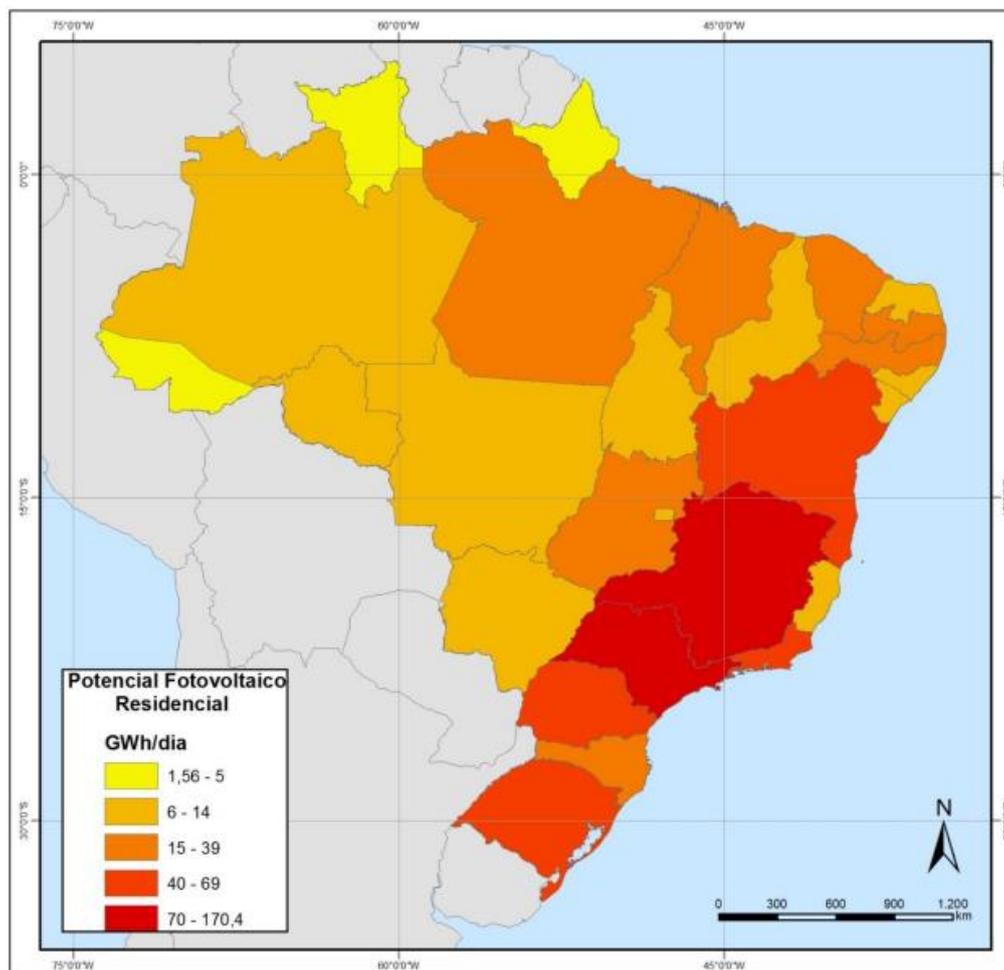


Figura 57 - Potencial Técnico de geração fotovoltaica em telhados residenciais por Unidade da Federação (GWh/dia).

Fonte: EPE (2014).

Vale destacar, que outros fatores além da radiação, também tendem a influenciar o futuro do desenvolvimento da energia solar, entre elas, podem-se citar o desenvolvimento tecnológico com relação à eficiência das placas solares e melhorias no aproveitamento da incidência direta dos raios solares, que tendem a influenciar o futuro do desenvolvimento da energia solar.

5.3.1 Contextualização para a bacia do rio São Francisco

De acordo com o Atlas Brasileiro de Energia Solar, a região do São Francisco apresenta grande potencial solar, principalmente nas regiões fisiográficas do médio e submédio São Francisco, atingindo valores de até 6.000 Wh/m² dia, como pode ser visto na Figura 58. Nesta figura, é apresentado com pontos na cor rosa, as usinas fotovoltaicas em construção com outorga; pontos azuis as construções não iniciadas; pontos amarelos as usinas com Despachos de Registro de Recebimento de Requerimento de Outorga (DRO), pontos roxos as usinas em operação e; em pontos verdes, as usinas atualmente pré-cadastradas.

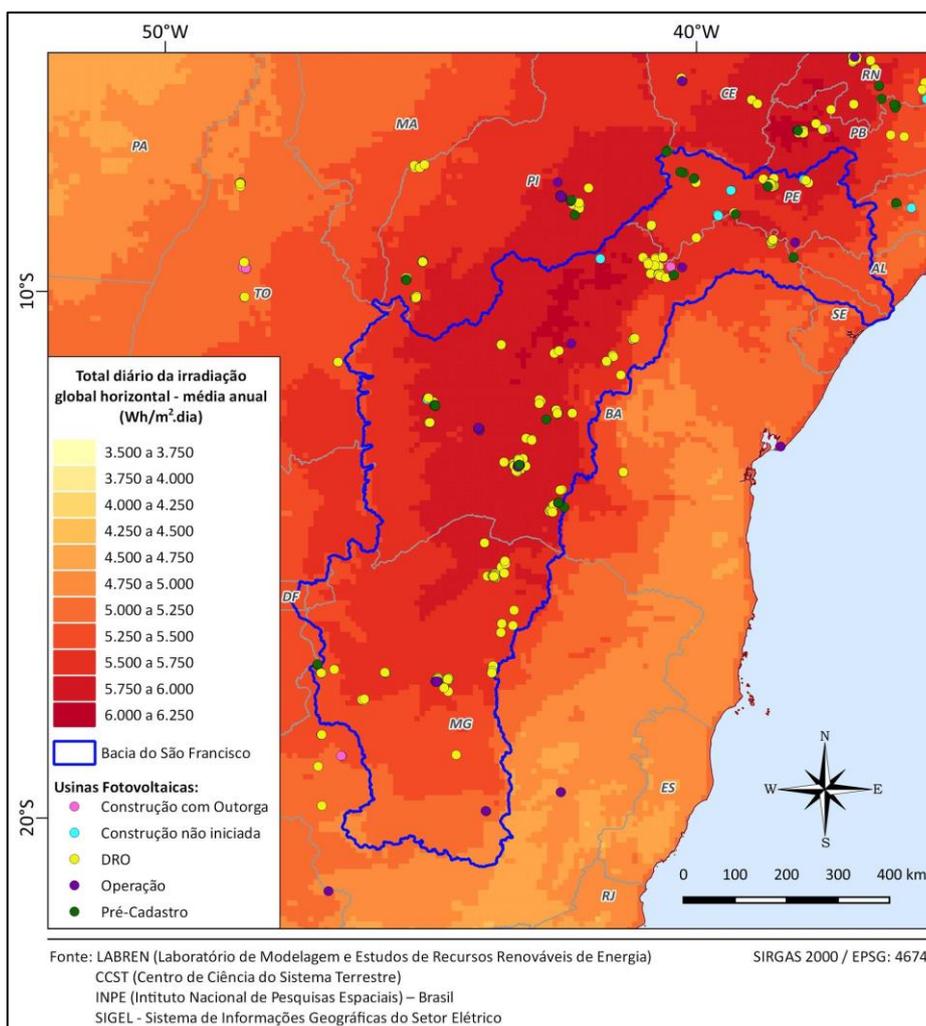


Figura 58- Total diário da irradiação global Horizontal - média anual (Wh/m². dia).

Fonte: LABREN/CCST/INPE (2017) e SIGEL (2018).

O trabalho de Fraidenraich (2004) aponta que a instalação de centrais solares na região do São Francisco poderia contribuir para reforçar a produção de energia elétrica da região, a qual já tem todo o seu potencial hidrelétrico em uso (10.271 MW), portanto, sendo de grande interesse em programas de desenvolvimento social e na agricultura irrigada. O autor também aponta que a implantação dessas centrais solares, ajudaria a resolver o constante conflito entre o uso da água e a produção de energia na região e que, em relação à projeção de potência instalada para os próximos 20 anos, pode-se considerar a possibilidade de sistemas aptos a suprir 50% da demanda energética das regiões irrigadas do São Francisco (300 MW).

Segundo a EPE (2014), os estados da Bahia e de Minas Gerais, onde estão às regiões fisiográficas do alto, médio e submédio São Francisco, apresentam grande potencial de produção fotovoltaica em telhados residenciais, tanto pelo potencial solar quanto por serem regiões com considerável densidade populacional (principalmente a região do alto São Francisco).

5.4 Biomassa

De acordo com a EPE (2018), em 2017 a biomassa foi responsável por 8,5% da oferta interna de eletricidade no Brasil, sendo que a participação dessa fonte na matriz de energia elétrica mais que dobrou na última década (Figura 59). Atualmente, a biomassa representa cerca de 30% da geração termelétrica, atrás somente do gás natural.

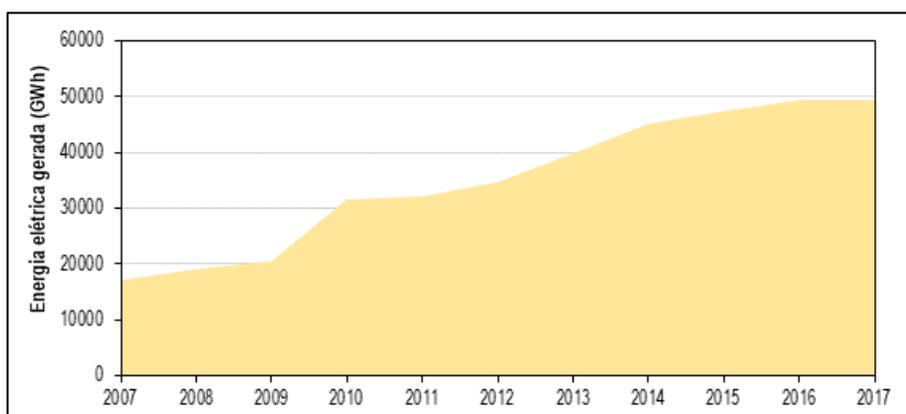


Figura 59 - Energia elétrica gerada a partir de biomassa no período de 2007-2017.

Fonte: EPE (2013, 2017, 2018).

Conforme ANEEL (2018), a geração de eletricidade a partir da biomassa possui capacidade instalada de 14.602 MW, com 557 empreendimentos em operação, sendo cerca de 73% as usinas movidas a bagaço de cana-de-açúcar, concentradas, sobretudo, na Região Centro-Sul do país (Figura 60). Outra fonte que se destaca são os resíduos florestais, principalmente lenha de eucalipto, utilizados como combustível em 10% das termelétricas à biomassa em operação. As demais fontes são compostas por resíduos sólidos urbanos, resíduos animais, resíduos agrícolas, restos vegetais, dentre outras.

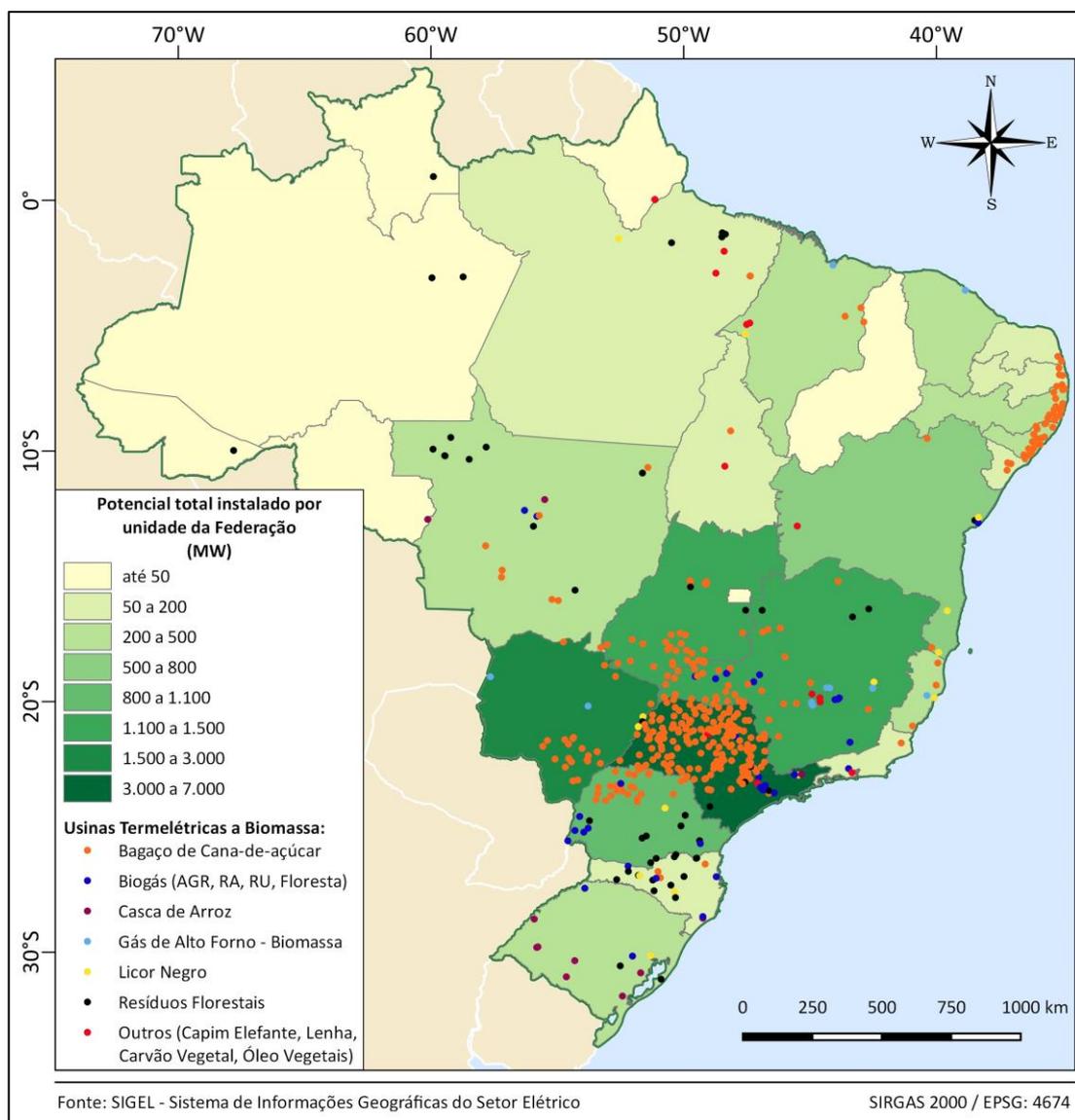


Figura 60 - Distribuição das usinas termelétricas a biomassa.

Fonte: SIGEL (2018).

Os impactos das mudanças do clima na geração de energia elétrica a partir da biomassa estão atrelados aos efeitos sobre as culturas bioenergéticas, cuja produção, rendimento e áreas de aptidão são significativamente influenciados por fatores climáticos. Assim, visto que o bagaço de cana-de-açúcar e os resíduos florestais, sobretudo de eucalipto, são os principais insumos para as termelétricas a biomassa no Brasil, o presente estudo avalia, com base na revisão de literatura, os possíveis impactos das mudanças climáticas sobre a produção dessas culturas no país. No entanto, é importante ressaltar que o aproveitamento energético da biomassa não é função direta da maior ou menor produção dessas culturas, uma vez que os aspectos econômicos, conjunturais e estruturais, especialmente do setor sucroalcooleiro, também influenciam a geração de energia elétrica.

5.4.1 Cana-de-açúcar

Segundo a União da Indústria da Cana-de-Açúcar (UNICA), em 2016, os Estados de São Paulo, Goiás, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Paraná e Alagoas apresentaram as maiores áreas plantadas de cana e, conforme ANEEL (2018), possuem também as maiores capacidades instaladas para geração de energia elétrica a partir do bagaço da cana (Tabela 6).

Tabela 6- Área plantada de cana-de-açúcar e capacidade instalada das usinas termelétricas a bagaço de cana nos seis maiores produtores.

Fonte: Adaptado de UNICA (2018) e ANEEL (2018).

Estado	Área Plantada (ha)	Potência Instalada (MW)
São Paulo	5.590.586	5.882
Goiás	931.342	1.357
Minas Gerais	911.614	1.239
Mato Grosso do Sul	658.282	1.094
Paraná	656.429	497
Alagoas	311.641	303

Para o Estado de São Paulo, maior produtor de cana-de-açúcar e onde estão situadas 50% das atuais termelétricas a bagaço de cana em operação (Figura 60), as mudanças no clima serão benéficas para a cultura, com redução do risco climático e elevação das médias de produtividade sem necessidade de irrigação, conforme mostra os estudos de Marin et al. (2013) e Pinto (2015).

O estudo de Marin et al. (2013) teve por objetivo a análise dos efeitos das mudanças climáticas na produtividade, eficiência do uso da água e necessidade de irrigação para a cultura de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo. Para tal, foram utilizados os modelos climáticos globais PRECIS e CSIRO, considerando os cenários A2 e B2 e o Modelo de Simulação de Crescimento (MSC) DSSAT/CANEGRO para o horizonte de 2050. Em todas as projeções climáticas avaliadas, Marin et al. (2013) observou um aumento da massa fresca de colmos, em média 24%, e redução da variabilidade do rendimento da cana para as condições de sequeiro. Seus resultados também indicaram o aumento da eficiência do uso da água (em média 34%), revelando que a irrigação não se tornará um requisito para a produção futura da cultura no Estado e, que além disso, quando considerada a atual taxa de melhoria tecnológica, as produtividades projetadas para 2050 variaram de 96 a 129 t/ha, que são respectivamente, 15 e 59% superiores à produtividade média do Estado (MARIN et al., 2013).

Pinto (2015) avaliou o risco climático para a cana-de-açúcar nas condições de mudanças climáticas para a região produtora da cultura no Estado de São Paulo, considerando os MCGs HadGEM2-ES e CSIRO-Mk3-6-0, os cenários de emissão RCP4.5 e RCP8.5 e os MSCs DSSAT/CANEGRO e APSIM-Sugar. Assim como no estudo de Marin et al. (2013), os resultados indicam um potencial positivo para a cana-de-açúcar no Estado, com redução do risco climático e elevação das médias de produtividade nas três épocas de colheita (maio, agosto e novembro), atingindo 16% no modelo APSIM-Sugar e 4% no modelo DSSAT/CANEGRO. A autora verificou, ainda, que os maiores riscos de perda de produtividade ocorreram para os cortes de novembro, o que é coerente com a realidade produtiva, uma vez que nessa época os canaviais enfrentam maiores estresses hídricos.

Estudo realizado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) e pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), apresentado em Assad e Pinto (2008), analisou o impacto das mudanças do clima sobre a produção agrícola brasileira, com base no zoneamento de risco climático e nos cenários A2 e B2 do IPCC. Para a cultura da cana-de-açúcar, o estudo apontou efeito benéfico do aumento de temperatura. Áreas do Sul do Brasil, especialmente do Estado do Rio Grande do Sul, hoje com restrições ao cultivo, podem se transformar em regiões de potencial produtivo, devido a possível redução das geadas. Já as áreas do Centro-Oeste, atualmente com alto potencial produtivo, Assad e Pinto (2008) conclui que devem permanecer como áreas de baixo risco, porém serão cada vez mais dependentes da irrigação complementar no período mais seco.

Evangelisa, Marin e Zullo Júnior (2009) simularam o efeito das mudanças climáticas sobre a produção de cana-de-açúcar nos municípios de Jataí, Goiânia e Goianésia, situados, respectivamente, no Sul, Centro e Norte do Estado de Goiás, considerando a elevação da temperatura em 1,8°C, 2,4°C e 4,0°C e o MSC DSSAT/CANEGRO para o horizonte de 2040. Em seus resultados, os autores mostram que para Jataí são apontados aumentos na produtividade da cana, entre 3% e 4%, à medida que ocorrem elevações da temperatura; para Goiânia, estatisticamente, não ocorreram alterações nos índices de produtividade e; o comportamento observado em Goianésia foi inverso, com redução da produtividade em 6%, em média, no cenário pessimista em relação ao otimista, isso porque o município está localizado na região do estado com maiores restrições hídricas.

Em relação à Região Norte, Collicchio et al. (2018) estudou o impacto das mudanças do clima sobre o zoneamento agroclimático da cana-de-açúcar em Tocantins, envolvendo os dados do modelo GFDL e os cenários B1 e A1B, para o período de 2021 a 2050. Os autores verificaram que, tanto nas condições climáticas atuais quanto nos cenários climáticos futuros, não há restrição térmica para o cultivo da cana-de-açúcar. No entanto, ressaltam que devido à elevação das deficiências hídricas, o cultivo da cana no

Estado deverá exigir, predominantemente, o uso de irrigação suplementar e plena, a fim de garantir um desenvolvimento adequado e obter boa produtividade da cultura.

Na Região Nordeste, a produção de cana-de-açúcar se concentra na Zona da Mata (Figura 60), com destaque para os Estados de Alagoas, Pernambuco e Paraíba. Em estudo desenvolvido por Santiago (2015) foram avaliados os efeitos das alterações da precipitação e temperatura do ar nas áreas de aptidão para cana-de-açúcar em Pernambuco. As projeções foram realizadas para os períodos de 2010-2040 e 2041-2070, utilizando o modelo climático regional Eta-HadCM3. Os resultados apontaram para os dois períodos analisados, redução da precipitação (em até 40% para 2010-2040 e até 60% para 2041-2070) e aumento das temperaturas médias, máximas e mínimas (em torno de 1°C a 3°C para 2010-2040 e de 1°C a 4°C para 2041-2070). A autora observa que o zoneamento agroclimático apresenta situação um pouco mais otimista para o primeiro período, com aumento de 7% nas áreas de aptidão plena e redução das áreas inaptas, em relação ao zoneamento atual. Já para o segundo período, devido às maiores restrições hídricas, informa que poderá haver mais áreas com condições restritas à inaptas do que com condições ideais ao cultivo da cana. Dessa forma, a autora conclui que a viabilidade futura da cana-de-açúcar em Pernambuco provavelmente irá depender da implantação de sistemas de irrigação e ou melhorias genéticas, com a finalidade de minimizar os impactos que as mudanças climáticas projetadas poderão acarretar.

Os estudos apresentados acima indicam que os cenários de mudanças climáticas mais prováveis para o Brasil serão, em geral, benéficos para a cultura da cana-de-açúcar, com possível aumento da produtividade nas principais regiões produtoras. No entanto, em alguns Estados a irrigação será necessária. Para Marin e Nassif (2013), a resposta positiva da cana-de-açúcar às alterações do clima será dada tanto pela resposta direta da fotossíntese à elevação na concentração do dióxido de carbono quanto pelo aumento da eficiência de uso da água. Contudo, os autores informam que é provável que o manejo na cultura necessite de adaptações uma vez que as plantas daninhas e doenças poderiam também ser favorecidas pelas condições futuras. Dessa forma, é

presumido que as alterações no clima poderão impactar, de forma positiva, a disponibilidade do potencial de geração de energia elétrica a partir do bagaço de cana.

5.4.2 Eucalipto

De acordo com a Indústria Brasileira de Árvores (Ibá), em 2016, dos 7,84 milhões de hectares de reflorestamento no país, 5,7 milhões foram destinados aos plantios de eucalipto, localizados, principalmente, em Minas Gerais (24%), São Paulo (17%) e Mato Grosso do Sul (15%) (Figura 61).

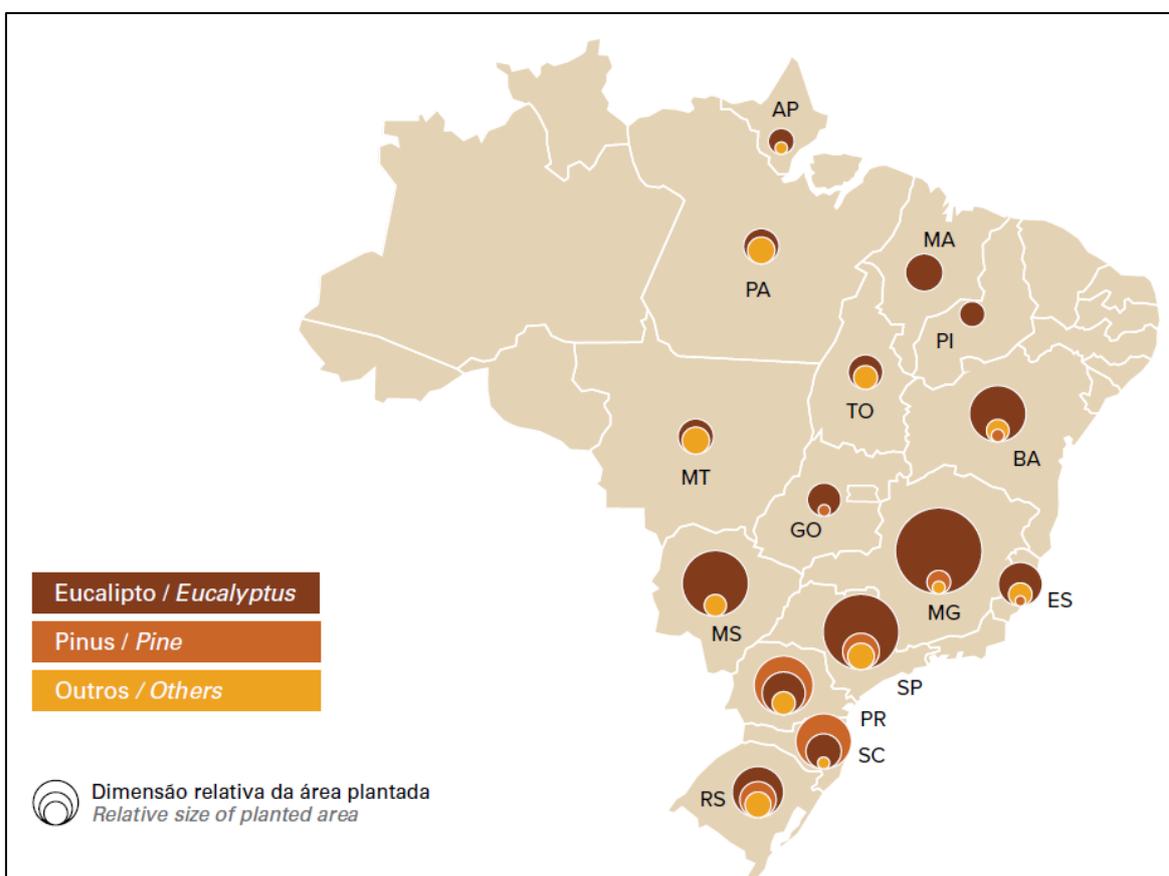


Figura 61 - Áreas de árvores plantadas no Brasil, por Estado e por gênero.

Fonte: Ibá (2017).

Segundo IBÁ (2017), diversos setores da indústria de árvores plantadas já são ou se aproximam da autossuficiência energética, substituindo as fontes fósseis por renováveis, especialmente o licor negro (subproduto da produção de celulose) e os

resíduos florestais. Diz, ainda, que as fábricas de celulose mais modernas já comercializam os excedentes de energia gerados, sendo que, no ano de 2016, 13,9 milhões de GJ foram vendidos para a rede pública.

Conforme ANEEL (2018), atualmente 54 usinas termelétricas utilizam os resíduos florestais como insumo energético e 18 o licor negro, com cerca de 409 MW e 2.626 MW de capacidade instalada, respectivamente.

A indústria de árvores plantadas já sente o efeito das mudanças climáticas sobre a cultura do eucalipto. De acordo com IBÁ (2017), ainda que o Brasil lidere o ranking global de produtividade florestal, com uma média de 35,7 m³/ha ao ano, nos últimos cinco anos a produtividade do eucalipto aumentou somente 0,2% a.a., o que tem sido atribuído ao impacto das alterações climáticas no regime de chuva de grande parte do território nacional e o avanço do plantio para novas fronteiras florestais.

Estudo de Baesso, Ribeiro e Silva (2010) apontou vulnerabilidade dos sistemas florestais às futuras variações climáticas. Os autores analisaram os impactos das mudanças do clima na produtividade futura do eucalipto na região norte do Espírito Santo e sul da Bahia, considerando o modelo global CCSR/NIES, os cenários A2 e B2 e o modelo de crescimento 3-PG para os períodos de 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100. Os resultados apontaram decréscimos na produtividade de eucalipto, de até 40% no cenário A2 para o período de 2071-2100 e 24% para o cenário B2.

Garcia et al. (2014) mapeou a aptidão climática do *Eucalyptus grandis* no Brasil, considerando o clima atual e os cenários de mudanças climáticas. Por meio da utilização da Modelagem de Distribuição de Espécies (MDE) e do modelo HadCM3 no cenário A1B para os períodos 2010-2039, 2040-2069 e 2070-2099, os autores verificaram que haverá diminuição das áreas aptas da espécie, devido, sobretudo, às mudanças que ocorrerão no regime de precipitação. As áreas aptas ao *Eucalyptus grandis* sofreram reduções de 2,8; 4,7 e 3,8% para os cenários 2010-2039, 2040-2069 e 2070-2099, respectivamente, sendo que as principais mudanças foram a diminuição da área potencial na Região Sudeste e aumento na Região Norte.

Marcolini (2014) avaliou o efeito das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do *Eucalyptus urograndis* no Estado do Tocantins, considerando os modelos GFDL-CM3 e HadGEM2 para três cenários de emissão (RCP2.6, RCP4.5 e RCP8.5) no período de 2041 a 2060. Os resultados apontaram intensas restrições hídricas no Estado, com diminuição drástica de áreas aptas e marginais e crescimento das áreas restritas para quase todo o território tocantinense.

Utilizando as mesmas configurações do estudo supracitado, Nunes e Collichio (2016) também avaliou o efeito das mudanças do clima no zoneamento agroclimático do *Eucalyptus urophylla* no Estado do Tocantins. Em todos os cenários, os autores verificaram aumento expressivo da área da classe restrita, que passou de 23,4% na climatologia atual, para 83,7%, 94,2% e 95,7% nos cenários RCP2.6, RCP4.5 e RCP8.5, respectivamente.

As pragas e as doenças também compõem uma das vulnerabilidades do setor florestal, especialmente dos plantios comerciais, mais propensos ao ataque de fungos e de insetos. As mudanças climáticas provavelmente elevarão o estresse abiótico em muitas áreas e também o estresse da planta, o que muitas vezes precede as epidemias de patógenos e insetos (HAKAMADA et al., 2015; KIRILENKO; SEDJO, 2009).

Para Auer et al. (2017), na Região Sul, a redução do frio, o aumento da pluviosidade e da umidade relativa do ar, em decorrência das mudanças climáticas, serão responsáveis pelo aumento da área favorável à ferrugem do eucalipto, principalmente nos períodos mais frios. A ferrugem do eucalipto, causada pelo fungo *Puccinia psidii*, atinge mudas e árvores jovens, reduzindo a capacidade fotossintética e, conseqüentemente, o rendimento volumétrico dos plantios.

Ao contrário da ferrugem, as mudanças climáticas contribuirão para a redução das áreas com potencial de estabelecimento do cancro do eucalipto, causado pelo fungo *Chrysosporthe cubensis*, segundo indicou estudo realizado por Pirovani et al. (2011). O trabalho utilizou o modelo HADCM3 para os cenários A2 e B2 no período atual e futuro (2020, 2050 e 2080).

A literatura a respeito dos impactos das mudanças climáticas sobre as florestas plantadas, especialmente as de rápido crescimento, é escassa no Brasil, como constatou Hakamada et al. (2015). Entretanto, os poucos estudos realizados indicam redução das áreas aptas ao plantio do eucalipto e, conseqüentemente, redução da disponibilidade de biomassa florestal para o aproveitamento energético.

5.4.3 Contextualização para a bacia do rio São Francisco

Os dados mais recentes do BIG da ANEEL (2018), indicam que na bacia do rio São Francisco estão em operação 28 usinas termelétricas à biomassa, que correspondem a uma capacidade instalada de cerca de 473 MW, conforme ilustrado na Figura 62.

Metade das termelétricas em operação são movidas a bagaço de cana-de-açúcar e estão localizadas, sobretudo, na cabeceira da bacia, em seis municípios da Região Centro-Oeste de Minas Gerais, justamente nas áreas aptas ao cultivo da cana, delineadas pelo Mapeamento Agroecológico da Cana-de-Açúcar (MANZATTO et al, 2009).

De acordo com a ANA (2017), mais de 80% das áreas dos cultivos de cana-de-açúcar dos municípios mineiros de João Pinheiro, Paracatu e Jaíba (nos quais se localizam seis das 14 termelétricas a bagaço de cana) são irrigadas. Dessa forma, ainda que diversos estudos apontem para o favorecimento da produção de cana frente às mudanças climáticas, a questão central seria a existência de disponibilidade hídrica na bacia, o que será abordado no próximo Produto.

As termelétricas que utilizam biomassa florestal (lenha, carvão vegetal e resíduos florestais) representam aproximadamente 18% das usinas em operação e também estão situadas nos municípios de cabeceira. A representatividade dessas usinas deve ser elevada nos próximos anos, visto que duas estão para construir e 13 estão cadastradas na ANEEL com DRO.

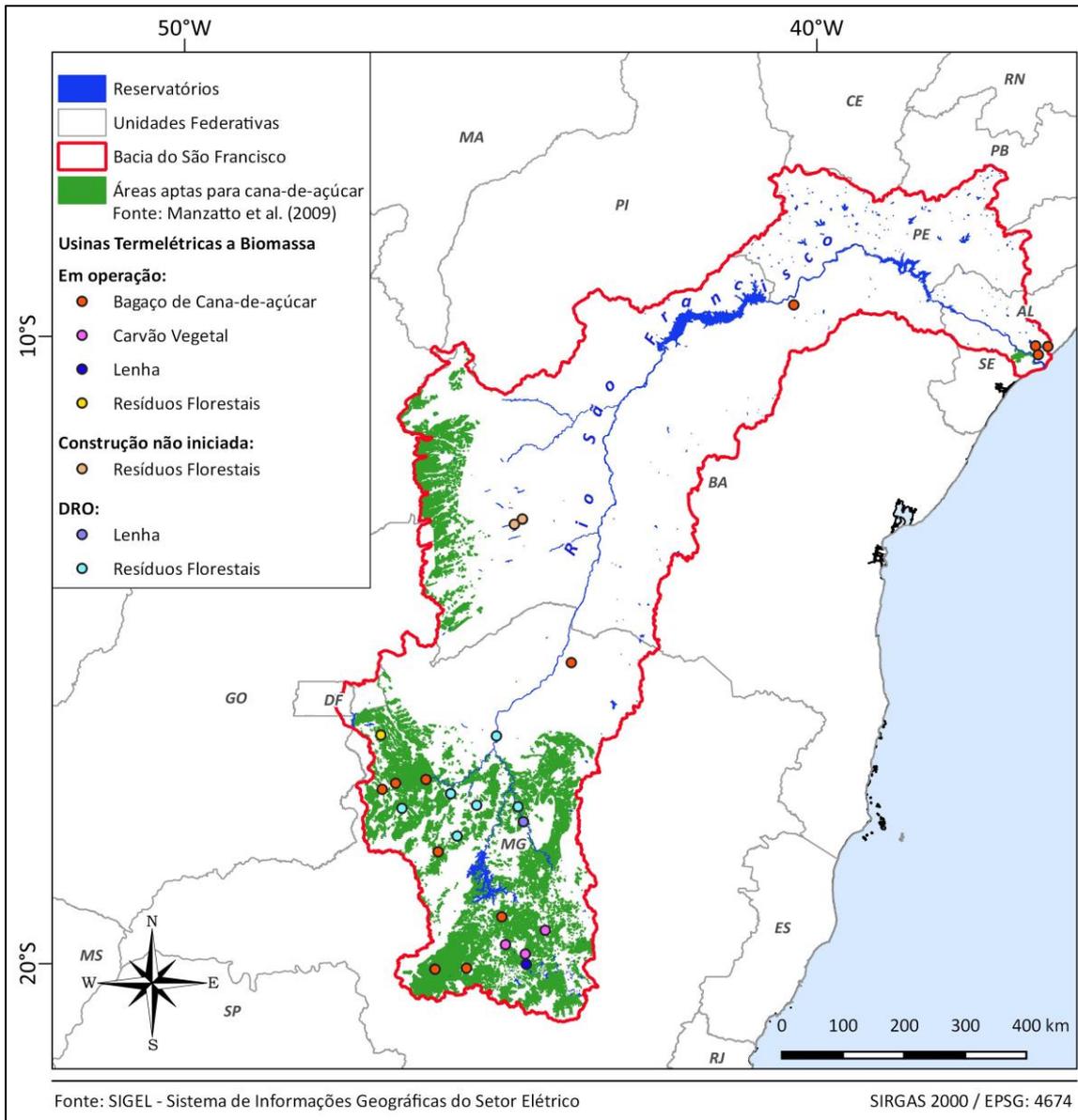


Figura 62 - Usinas termelétricas a biomassa na bacia do rio São Francisco.

Fonte: SIGEL (2018).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os diversos estudos abordados neste relatório, elaborados a partir dos dois últimos conjuntos de cenários do IPCC (cenários SRES e RCPs) para projeções climáticas de médio (2041-2070) e longo prazo (2071-2100), indicam que o Brasil estará exposto aos efeitos das mudanças climáticas. As projeções mostram, com maior grau de certeza,

indícios de aumento significativo da temperatura do ar em algumas localidades do país. As incertezas nas projeções da precipitação mostram-se maiores quando se tratam das variações em seu regime sazonal. Todavia, em termos gerais, os resultados dos estudos mostram tendências de diminuição das chuvas no decorrer do século XXI, principalmente em uma grande área que se estende desde o Norte até a região Sudeste do Brasil nos meses de verão austral. Tais perspectivas podem impactar significativamente as principais bacias hidrográficas brasileiras. A região Sul do país é a que apresenta maior concordância entre as projeções, com aumento das chuvas principalmente no período de verão austral. Além dessas mudanças, espera-se que as mudanças climáticas modifiquem a frequência, a intensidade e a duração dos eventos extremos em muitas regiões do país. O risco de eventos extremos de clima, tais como precipitação extrema, ondas de calor e estiagens prolongadas, pode-se tornar mais frequentes no futuro.

Diferenças de resultados entre modelos climáticos a respeito de variáveis meteorológicas, especialmente a precipitação, além das variações regionais e temporais, demonstram a grande importância de os estudos incluírem um conjunto maior de modelos climáticos (*ensemble*) com intuito de avaliar melhor as principais tendências, minimizar as incertezas das projeções e obter resultados mais confiáveis. Vale ressaltar que, mesmo com a utilização de um conjunto maior de modelos climáticos, incertezas ainda são inevitáveis. De modo geral, isso se deve ao fato de que:

- i. As incertezas associadas às variáveis climáticas, sobretudo as ligadas ao setor elétrico, estão relacionadas à resolução do modelo, uma vez que resoluções muito grosseiras podem não representar características regionais/locais, como a topografia e a hidrografia;
- ii. O tratamento não físico das condições de contorno lateral e as saídas dos modelos globais as quais são usadas como condições de contorno lateral para os modelos regionais;
- iii. As representações inadequadas das parametrizações físicas, tendo em vista à natureza caótica da atmosfera e a falta de conhecimento completo do sistema

climático, o que não permite a representação física e computacional dos fenômenos e variáveis atmosféricas de maneira 100% fidedigna com relação ao clima.

Em relação às projeções climáticas, há ainda a incerteza referente aos cenários de emissão e concentração dos Gases de Efeito Estufa, uma vez que não se sabe ao certo, como será o comportamento da emissão e a concentração no futuro. Vale ressaltar que a variável precipitação é uma das que possui maior incerteza devido ao grande número de parâmetros envolvidos em seu cálculo dentro dos modelos climáticos.

Com relação ao setor energético, o Brasil apresenta forte potencial para implementação de energias alternativas como a solar, tendo em vista o alto potencial existente em todo o país, para o período atual e futuro. Projeções indicam pequenas reduções no potencial solar brasileiro ao longo do século XXI, porém não são consideradas significativas, uma vez que o país ainda se encontrará no intervalo considerado adequado para a produção de energia solar. Além disso, fatores como o desenvolvimento tecnológico com relação à eficiência das placas solares e melhorias no aproveitamento da incidência direta dos raios solares também tendem a influenciar o futuro do desenvolvimento da energia solar.

No que diz respeito à energia eólica, em geral, as projeções apontam para o aumento do potencial eólico no país, indicando que os parques eólicos brasileiros continuarão promissores para a produção de energia, principalmente na Região Nordeste brasileira. Em complemento a essa condição favorável quanto ao potencial disponível frente aos cenários de mudanças climáticas, essa fonte energética destaca-se com percentuais representativos na composição futura da matriz energética brasileira.

Em relação à geração de energia elétrica a partir de biomassa, os estudos levantados apontam diferentes tendências para os dois principais insumos bioenergéticos utilizados no país: a cana-de-açúcar e o eucalipto. Para a cana-de-açúcar, as prováveis alterações no clima serão benéficas, com aumento da produtividade nas principais regiões produtoras. Contudo, em algumas regiões será necessária a utilização da irrigação, além de adaptações no manejo da cultura, em função de plantas daninhas e

doenças que também poderão ser favorecidas pelas condições futuras. De forma contrária, as possíveis mudanças no clima irão provocar redução de áreas aptas ao plantio de eucalipto. É válido ressaltar que o aproveitamento energético desses insumos não é função direta da maior ou menor produção das culturas, haja vista que os aspectos econômicos, conjunturais e estruturais, especialmente do setor sucroalcooleiro, também influenciam a geração de energia elétrica.

Na área da geração hidrelétrica é que se concentram grande parte dos estudos sobre impactos de mudanças climáticas no setor elétrico brasileiro. Sendo responsável atualmente por cerca de 68% da geração elétrica do país, o grande potencial hidrelétrico ainda disponível está localizado nas bacias da região amazônica. Entretanto, os estudos levantados mostram que a maioria das projeções de mudanças climáticas indicam reduções nas vazões afluentes das bacias hidrográficas das regiões Norte e Nordeste do Brasil. Por outro lado, as bacias da região Sul e parte das bacias do Sudeste possuem indicação de aumento na chuva para os períodos futuros, com consequente aumento das vazões afluentes e da geração de energia nas usinas hidrelétricas dessa região.

Esses resultados devem ser analisados com a devida cautela, dadas às incertezas inerentes das projeções, mas são uma sinalização importante para o planejamento do setor. O monitoramento da temperatura global mostra que a taxa de aumento tem sido muito próxima do cenário mais pessimista (RCP8.5) e estudos recentes alertam para a possibilidade de aceleração e irreversibilidade desse processo (STEFFEN et al, 2018).

Com base nos estudos analisados, observa-se a necessidade premente de considerar o efeito das mudanças climáticas nos estudos de planejamento da geração e da transmissão de energia elétrica. Apesar dos modelos climáticos ainda possuírem incertezas e limitações, nota-se, em partes, convergência dos resultados dos diversos estudos apresentados, podendo assim fornecer um panorama qualitativo das tendências futuras. Além disso, com o aprimoramento crescente dos Modelos Climáticos Globais será possível também quantificar os efeitos das mudanças climáticas para os diferentes tipos de geração renovável.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAM, K. N., COLLISCHONN, W., Fan, F. M., BRAVO, J. M. Influência da técnica de remoção de viés aplicada em estudos de mudanças climáticas na bacia do Rio Uruguai. Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (22.: Florianópolis, 2017). Anais [recurso eletrônico]. Porto Alegre: ABRH, 2017, 2017.
- ALLEY, R. et al. Climate Change 2007, the Physical Science Basis: Summary for Policymakers: Contribution of Working Group I to the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC Secretariat, 2007.
- AMBRIZZI T. et al. Cenários regionalizados de clima no Brasil para o século XXI: projeções de clima usando três modelos regionais. Relatório 3, Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Biodiversidade e Florestas, Diretoria de Conservação da Biodiversidade - Mudanças climáticas globais e efeitos sobre a biodiversidade – Subprojeto: Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI. Brasília, 108 pp. 2007.
- AMBRIZZI, T.; REBOITA, M. S.; ROCHA, R. P.; LLOPART, M. The state-of-the-art and fundamental aspects of regional climate modeling in South America. Annals of the New York Academy of Sciences, 2018. DOI: 10.1111/nyas.13932
- ANA. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: regiões hidrográficas brasileiras. Agência Nacional de Águas. Edição Especial. Brasília. 2015. 163 p.
- ANA. Mudanças Climáticas e Recursos Hídricos: avaliação e Diretrizes para Adaptação. Agência Nacional de Águas. Brasília: ANA, GGES, 2016.
- ANA. Levantamento da Cana-de-Açúcar Irrigada na Região Centro-Sul do Brasil. AGÊNCIA NACIONAL DAS AGUAS. Brasília, 2017. 31p.
- ANEEL. Relatório Final de Hidrologia do Projeto Estratégico de P&D nº 010/2008 da ANEEL – “Efeitos de mudanças climáticas no regime hidrológico de bacias hidrográficas e na energia assegurada de aproveitamentos hidrelétricos”. Agência Nacional de Energia Elétrica. 2014.

- ANEEL. Banco de Informações de Geração. Agência Nacional de Energia Elétrica. 2018. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 06 ago. 2018.
- ARIAS, D. A. G. Planejamento de transferências de riscos hidrológicos sob a abordagem de “severidade-duração-frequência” da seca como uma estratégia de mitigação dos impactos das mudanças climáticas. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.
- ARORA, V. K.; SCINOCCA, J. F.; BOER, G. J.; CHRISTIAN, J. R.; DENMAN, K. L.; FLATO, G. M.; KHARIN, V. V.; LEE, W. G.; MERRYFIELD, W. J. Carbon emission limits required to satisfy future representative concentration path ways of greenhouse gases. *Geophysical Research Letters*, v. 38, n. 5, p. L05805, 2011.
- AUER, C. G.; BRITO, G. S.; WREGE, M. S.; SANTOS, A. F. Capítulo 13: Influência das mudanças climáticas nas zonas de ocorrência da ferrugem do eucalipto na região Sul do Brasil. *Aquecimento Global e Problemas Fitossanitários*. EMBRAPA. Brasília, 2017. 489 p.
- AVILA, A. M. H. Uma síntese do quarto relatório do IPCC. *Revista Multiciência*, v. 8, p. 163-168, 2007.
- BAESSO, R. C. E; RIBEIRO, A.; SILVA, M. P. Impacto das mudanças climáticas na produtividade do eucalipto na região norte do Espírito Santo e sul da Bahia. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v.20, n.2, p. 335-344, 2010.
- BÁRDOSSY, A.; PEGRAM, G. Downscaling precipitation using regional climate models and circulation patterns toward hydrology. *Water Resources Research*, v. 47, n.4, p. W04505, 2011.
- BARRETO, N. de J. da. C.; MENDES, D.; LUCIO, P. S. Avaliação Preliminar da Sensibilidade dos Modelos do CMIP5 a Precipitação Sazonal do Brasil Tropical. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v.6, n.4, 875-887, 2013.
- BARROS, V.; CLARKE, R. T.; SILVA DIAS, P. L. El cambio climático en la cuenca del Plata. CIMA CONICET. Buenos Aires. 2006.

- BETTS, A. K.; MILLER, M. J. A new convective adjustment scheme. Part II: Single column tests using GATE wave, BOMEX, ATEX and arctic air-mass data sets. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, v. 112, n. 473, p. 693-709, 1986. doi: 10.1002/qj.49711247308
- BETTS, R.; NOBRE, C.; KAY, G.; SAMPAIO, G., CHOU, S. Riscos das mudanças climáticas no Brasil- Capítulo: Como modelamos o clima. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2011.
- BJØRNÆS, C. A guide to Representative Concentration Pathways. CICERO. Center for International Climate and Environmental Research, 2013.
- BLACK, T. L. The new NMC mesoscale Eta model: Description and forecast examples. Weather and forecasting, v. 9, p. 265-278, 1994. DOI: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0434\(1994\)009<0265:TNNMEM>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0434(1994)009<0265:TNNMEM>2.0.CO;2)
- BRAMS, Sistema de Modelagem Atmosférica Regional. CPTEC/INPE. 2015. Disponível em: <<http://brams.cptec.inpe.br/about/>>. Acesso em: 24 jul. 2018.
- CABRÉ, M. F.; SOLMAN, S.; NÚÑEZ, M. Regional climate change scenarios over southern South America for future climate (2080-2099) using the MM5 Model. Mean, interannual variability and uncertainties. *Atmósfera*, v. 29, n. 1, p. 35-60, 2016.
- CAMPOS, D. A. Simulações do modelo Eta utilizando dois esquemas de radiação em condições de céu claro. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015.
- CARVALHO, M. Â. V. de.; OYAMA, M. D. Variabilidade da largura e intensidade da Zona de Convergência Intertropical atlântica: aspectos observacionais. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 28, n. 3, p. 305-316, 2013.
- CEPEL. Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. Atlas do Potencial Eólico Brasileiro: Simulações 2013 / Centro de Pesquisas de Energia Elétrica-CEPEL – Rio de Janeiro: CEPEL, 2017. 50 p. il.
- CHOU, S. C.; TANAJURA, C. A. S.; XUE, Y.; NOBRE, C. A. Validation of the coupled Eta/SSiB Model over South America. *J. Geophys. Res.*, v. 107, n. D20, p. art. 8088, Oct. 2002. (INPE-9969-PRE/5529). DOI:10.1029/2000JD000270, 2002.

- CHOU, S. C.; BUSTAMANTE, J. F.; GOMES, J. L. Evaluation of Eta Model seasonal precipitation forecasts over South America. *Nonlinear Processes in Geophysics*, v. 12, p. 537-555, 2005.
- CHOU, S. C. Modelo regional Eta. *Climanálise Especial Edição Comemorativa de 10 anos*, MCT/INPE/CPTEC, Cachoeira Paulista, 1996.
- CHOU, S. C.; MARENGO, J. A.; LYRA, A. A.; SUEIRO, G.; PESQUERO, J. F.; ALVES, L. M.; KAY G.; BETTS, R.; CHAGAS, D. J.; GOMES, J. L.; BUSTAMANTE, J. F.; TAVARES, P. S. Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs. *Climate dynamics*, v. 38, n. 3-4, p. 635-653, 2012. Doi: 10.1007/s00382-011-1002-8
- CHOU, S. C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DERECZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; MARENGO, J. Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. *American Journal of Climate Change*, v. 03, p. 512-527, 2014a. Doi: 10.4236/ajcc.2014.35043
- CHOU, S. C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DERECZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J. F.; TAVARES, P. S.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; NOBRE, P.; MARENGO, J. Evaluation of the Eta simulations nested in three global climate models. *American Journal of Climate Change*, v. 3, n. 05, p. 438, 2014b. Doi: 10.4236/ajcc.2014.35039
- CHOU, S. C.; LYRA, A.; GOMES, J. L.; MARENGO, J. A.; ALVES, L. M. Modelos Climáticos Regionais futuros com modelo Eta. In: LIMA, J. W. M.; COLISCHONN, MARENGO, J. A. (Orgs.). *Efeitos das mudanças climáticas na geração de energia elétrica*. São Paulo: Hunter Books Editora, 2014c, p. 65-91.
- CHOU, S. C.; NOBRE, P. PBMC (2014): Base científica das mudanças climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho 1 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas [AMBRIZZI, T.; ARAUJO, M. (eds.)]. Capítulo 8: Avaliação de modelos globais e regionais climáticos. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 464 pp.

- CHOU, S. C.; SILVA, A.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C. et al. Simulações em alta resolução das mudanças climáticas sobre a América do Sul. Eds. In: Modelagem Climática e Vulnerabilidades Setoriais à Mudança do Clima no Brasil. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação Brasília, Brasília, DF, cap. 2, p. 49-85, 2016.
- CHOU, S. C.; LYRA, A. de. A.; CHAGAS, D. J.; SUEIRO, G.; GOMES, J. L.; CAMPOS, D.; RODRIGUES, D. C.; TAVARES, P.; RODRIGUEZ, D. Projeções de mudanças de precipitação na Bacia Do Rio São Francisco. In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Florianópolis. Anais... 2017.
- CMIP5. Modeling Groups and their Terms of Use. Coupled Model Intercomparison Project Disponível em: <https://cmip.llnl.gov/cmip5/docs/CMIP5_modeling_groups.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2018.
- COLLICCHIO, E.; ROCHA, H. R.; VICTORIA, D. C.; BALLESTER, M. V. R.; TOLEDO, A. M. A. Implicações das mudanças do clima no zoneamento agroclimático da cana-de-açúcar no Estado de Tocantins, considerando o modelo GFDL. Revista Brasileira de Geografia Física. Recife, v. 08, n. 06, p. 1730-1747, 2015.
- COLLINS, W. J.; BELLOUIN, N.; DOUTRIAUX-BOUCHER, M.; GEDNEY, N.; HALLORAN, P.; HINTON, T.; et al. Development and evaluation of an Earth-System model – HadGEM2. Geoscientific Model Development, v. 4, p. 1051–1075, 2011. DOI:10.5194/gmd-4-1051-2011
- COLLINS, M.; KNUTTI, R.; ARBLASTER, J.; DUFRESNE, J. -L.; FICHEFET, T.; FRIEDLINGSTEIN, P.; GAO, X.; GUTOWSKI, W. J.; JOHNS, T.; KRINNER, G.; SHONGWE, M.; TEBALDI, C.; WEAVER, A. J.; WEHNER, M. Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility. 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 [STOCKER, T. F.; QIN, D.; PLATTNER, G. -K.; TIGNOR, M.; ALLEN, S. K.; BOSCHUNG, J.; NAUELS, A.; XIA, Y.; BEX, V.; MIDGLEY, P. M. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013.

- CRESESB. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos CEPEL. Rio de Janeiro, 2014.
- CRESESB. Radiação Solar. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito (CRESESB), Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL). Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=301>. Acesso em: 22 ago. 2018.
- CHRISTENSEN et al. Regional climate projections (Eds.), Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, 2007a.
- CHRISTENSEN et al. Evaluating the performance and utility of regional climate models: The PRUDENCE project Climatic Change, 81 (2007), pp. 1-6, 2007b. doi:10.1007/s10584-006-9211-6
-
- CUBASCH, U.; WUEBBLES, D.; CHEN, D.; FACCHINI, M. C.; FRAME, D.; MAHOWALD, N.; WINTHER, J. -G. 2013: Introduction. 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 [STOCKER, T. F.; QIN, D.; PLATTNER, G. -K.; TIGNOR, M., ALLEN, S. K.; BOSCHUNG, J.; NAUELS, A., XIA, Y.; BEX, V.; MIDGLEY, P. M. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- DEBORTOLI, N. S.; CAMARINHA, P. I. M.; MARENGO, J. A.; RODRIGUES, R. R. An index of Brazil's vulnerability to expected increases in natural flash flooding and landslide disasters in the context of climate change. Natural Hazards, v. 86, n. 2, p. 557-582, 2017.
- DÉQUÉ, M. et al. Global high resolution versus Limited Area Model climate change projections over Europe: quantifying confidence level from PRUDENCE results. Climate Dynamics, v. 25, n. 6, p. 653-670, 2005.

- DIAS, M. A. F. da. S.; SILVA, M.G.A.J. da. Para entender tempo e clima. In: CAVALCANTI, I. D. A.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. A. J. da., SILVA DIAS, M. A. F. (Orgs.). Tempo e Clima no Brasil. São Paulo: Oficina de Textos, 2009, p. 15-21.
- EICHELBERGER, SCOTT et al. Climate change effects on wind speed. N Am Windpower, v. 7, p. 68-72, 2008.
- EK, M. B.; MITCHELL, K. E.; LIN, Y.; ROGERS, E.; GRUMMANN, P.; KOREN, V.; GAYNO, G.; TARPLEY, J. D. Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, v. 108, n. D22, 2003. doi: 10.1029/2002JD003296
- ELGUINDI, N.; BI, X.; GIORGI, F.; NAGARAJAN, B.; PAL, J.; SOLMON, F.; RAUSCHER, S.; ZAKAY, A.; O'BRIEN, T.; NOGHEROTTO, R.; GIULIANI, G. Regional Climate Model RegCM Reference Manual Version 4.5. The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics. Trieste. Italy. Maio, 2014.
- EPE. Nota Técnica DEA 19/14– Inserção da Geração Fotovoltaica Distribuída no Brasil – Condicionantes e Impactos. Empresa de Pesquisa Energética: Rio de Janeiro. Out. 2014.
- _____. Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2017: ano base 2016. Empresa de Pesquisa Energética: Brasília, 2017, 232 p. Disponível em: <<http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anuario2017vf.pdf>>. Acesso em: 03 ago. 2018.
- _____. Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2013. Empresa de Pesquisa Energética: Brasília, 2013, 253 p. Disponível em: <<http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anu%C3%A1rio%20Estat%C3%ADstico%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202013.pdf>>. Acesso em: 03 ago. 2018.
- _____. Balanço Energético Nacional 2018: Relatório Síntese ano base 2017. Empresa de Pesquisa Energética: Rio de

- Janeiro, 2018, 62 p. Disponível em: <<http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-397/Relat%C3%B3rio%20S%C3%ADntese%202018-ab%202017vff.pdf>>.
- Acesso em: 03 ago. 2018.
- EVANGELISA, B. A.; MARIN, F. R.; ZULLO JR, J. Impacto das mudanças climáticas sobre a produção de cana-de-açúcar no Estado de Goiás. XVI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 22 a 25 de setembro de 2009. Belo Horizonte.
 - FARINA, L. Previsão de Ondas Oceânicas por Ensemble: Uma Revisão e Estudo de Caso. Pesquisas em Geociências [online] v. 33, n. 1, p. 117- 124. 2006.
 - FBDS. Mudanças Climáticas e Eventos Extremos no Brasil. Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável. Rio de Janeiro, 2009.
 - FELLS, S. B.; SCHWARZKOPF, M. D. The simplified exchange approximation: A new method for radiative transfer calculations. Journal of the Atmospheric Sciences, v. 32, n. 7, p. 1475-1488, 1975. doi: 10.1175/1520-0469(1975)032<1475:TSEAAN>2.0.CO;2
 - FERREIRA, A. G.; MELLO, N. G. S. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região nordeste do Brasil e a influência dos Oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. Revista Brasileira de Climatologia, v. 1, n. 1, p. 15-28, 2005.
 - FERRIER, BRAD S. et al. Implementation of a new grid-scale cloud and precipitation scheme in the NCEP Eta model. In: Conference on weather analysis and forecasting. AMS. p. 280-283, 2002.
 - FRAIDENRAICH, N. Tecnologia solar no Brasil. Os próximos 20 anos. In: Conferência sobre Sustentabilidade na geração e uso da energia no Brasil: os próximos. v. 20. 2004.
 - FREITAS, M. A. V.; SOITO, J. L. S. Energia e Recursos Hídricos. Parcerias Estratégicas. Mudança do clima no Brasil: vulnerabilidade, impactos e adaptação – Centro de Gestão de Estudos Estratégicos (CGEE), Brasília, v. 13, n. 27, 2008.

- FESER, F.; ROCKEL, B.; VON STORCH, H.; WINTERFELDT, J.; ZAHN, M. Regional climate models add value to global model data: a review and selected examples. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 92, n. 9, p. 1181-1192, 2011.
- GAO, X.; PAL, J. S.; GIORGI, F. Projected changes in mean and extreme precipitation over the Mediterranean region from a high resolution double nested RCM simulation. *Geophysical Research Letters*, v. 33, n. 3, 2006.
- GARCIA, L. G.; FERRAZ, S. F. B.; ALVARES, C. A.; FERRAZ, K. M. P. M. B; HIGA, R. C. V. Modelagem da aptidão climática do *Eucalyptus grandis* frente aos cenários de mudanças climáticas no Brasil. *Scientia Forestalis*, v. 42, n. 104, p. 503-511. Piracicaba, 2014.
- GASTINEAU, G; SODEN, B. J. Evidence for a weakening of tropical surface wind extremes in response to atmospheric warming. *Geophysical Research Letters*, v. 38, n. 9, 2011.
- GELLENS, D.; ROULIN, E. Streamflow response of Belgian catchments to IPCC climate change scenarios. *Journal of Hydrology*, v. 210, n. 1-4, p. 242-258, 1998.
- GIORGI, F.; MEARNS, L. O. Approaches to the simulation of regional climate change: a review. *Reviews of Geophysics*, v. 29, n. 2, p. 191-216, 1991.
- GIORGI, F. et al. Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework. *World Meteorological Organization (WMO) Bulletin*, v. 58, n. 3, p. 175, 2009.
- GRIFFIES, S. M. Elements of MOM4p1. NOAA/Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Ocean Group Technical Report, n. 6, 2009, p. 444.
- GRUBB, M. J; MEYER, N. I. Wind energy: resources, systems and regional strategies. In: JO-HANSSON, T. B. et al. *Renewable energy: sources for fuels and electricity*. Washington, D.C.: Island Press, 1993.
- HAKAMADA, R. E. et al. Anais da 47ª Reunião Técnico-Científica do Programa Cooperativo sobre Silvicultura e Manejo “Adaptação Genotípica e Silvicultural aos Estresses Abióticos e Bióticos”. *Série Técnica IPEF*, v.20, n.41. Piracicaba, 2015.

- HASUMI, H. CCSR Ocean Component Model (COCO), version 4.0. Center for Climate System Research, 111 p., 2015. Disponível em: <<http://ccsr.aori.u-tokyo.ac.jp/~hasumi/COCO/coco4.pdf>>. Acesso em: 16 jul. 2018.
- HARTMANN, D. H. Global Physical Climatology. Academic Press, v. 56, 1994.
- HAY, L. E.; WILBY, R. L.; LEAVESLEY, G. H. A comparison of delta change and downscaled GCM scenarios for three mountainous basins in the United States. Journal of the American Water Resources Association, v. 36, p. 387–398, 2000.
- HAYLOCK, M. R. et al. Trends in total and extreme South American rainfall in 1960–2000 and links with sea surface temperature. Journal of climate, v. 19, n. 8, p. 1490-1512, 2006.
- HEWITT, C. D. The ENSEMBLES Project: Providing ensemble-based predictions of climate changes and their impacts. Published article appears in the EGGS newsletter, 13, 22-25. 2005.
- HINKELMAN, L. M.; ACKERMAN, T. P.; MARCHAND, R.T. An evaluation of NCEP Eta Model predictions of surface energy budget and cloud properties by comparison with measured ARM data. J. Geophys. Res., v. 104, n. 19, p. 535–19549, 1999.
- IBA. Relatório 2017. Indústria Brasileira de Árvores. 80 p. 2017.
- INPE. BESM-Brazilian Earth System Model. Disponível em: <<http://www.inpe.br/besm/modelo-besm/>>. Acesso em: 23 jul. 2018.
- ICTP. Regional Model: REGCM4. A Regional Climate Model system. International Centre for Theoretical Physics. 2014. Disponível em: <<https://www.ictp.it/research/esp/models/regcm4.aspx>>. Acesso em: 23 jul. 2018.
- IPCC, 1990: Climate Change: The IPCC Scientific Assessment-Report of IPCC Working Group. Cambridge Univ. Press. 1990.
- IPCC. Climate Change 1995: The Science of Climate Change-Contribution of Working Group 1 to the IPCC Second Assessment Report. HOUGHTON, J. T.,

- MEIRA FILHO, L. G.; CALLANDER, B. A.; HARRIS, N.; KATTEMBERG A.; MASKELL, K. (Eds.) Cambridge Univ. Press. 1996a.
- IPCC. Climate Change 1995: The Science of Climate Change-Summary for Policymakers and Technical Summary of the Working Group I Report. Cambridge Univ. Press. 1996b. 56 p.
 - IPCC. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [HOUGHTON, J.T.; DING, Y.; GRIGGS, D. J.; NOGUER, M.; VAN DER LINDEN, P. J.; DAI, X.; MASKELL K.; JOHNSON, C. A. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2001. 881p.
 - IPCC. Climate Change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007.
 - IPCC. Glossary of terms. In: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation [FIELD, C. B.; BARROS, V.; STOCKER, T. F.; QIN, D.; DOKKEN, D. J.; EBI, K. L.; MASTRANDREA, M. D.; MACH, K. J.; PLATTNER, G. -K.; ALLEN, S. K.; TIGNOR, M.; MIDGLEY, P. M. (eds.)]. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, p. 555-564, 2012.
 - IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [STOCKER, T.F.; QIN, D.; PLATTNER, G. K.; TIGNOR, M.; ALLEN, S.K.; BOSCHUNG, J.; NAUELS, A.; XIA, Y.; BEX, V.; MIDGLEY, P.M. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p. 2013.
 - IPCC. IPCC Factsheet: What is the IPCC?. Geneva, ago. 2013. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/news_and_events/docs/factsheets/FS_what_ipcc.pdf>. Acesso em 25 jul. 2018.

- IPCC. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing TEAM, R.K. PACHAURI; L.A. MEYER (Eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p., 2014. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>>. Acesso em: 03 jul. 2018.
- IRENA. Renewable Power Generation Costs in 2017, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2018.
- JACOB, D. et al. EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, v. 14, n. 2, p. 563-578, 2014.
- JANJÍČ, Z. I. Nonlinear advection schemes and energy cascade on semi-staggered grids. *Monthly Weather Review*, v. 112, n. 6, p. 1234-1245, 1984. DOI: 10.1175/1520-0493(1984)112<1234:NASAEC>2.0.CO;2
- KRÜGER, L. F.; ROCHA, R. P.; REBOITA, M. S.; AMBRIZZI, T. RegCM3 nested in HadAM3 scenarios A2 and B2: projected changes in extratropical cyclogenesis, temperature and precipitation over the South Atlantic Ocean. *Climatic change*, v. 113, n. 3-4, p. 599-621, 2012. DOI: 10.1007/s10584-011-0374-4
- LABREN (Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia) / CCST (Centro de Ciência do Sistema Terrestre) / INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) – Brasil. Base de dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar 2ª Edição. Disponível em: <http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html#>. Acesso em: 22 ago. 2018.
- LACIS, A. A.; HANSEN, J. E. A parameterization for the absorption of solar radiation in the earth's atmosphere. *Journal of the atmospheric sciences*, v. 31, n. 1, p. 118-133, 1974. DOI: 10.1175/1520-0469(1974)031<0118:APFTAO>2.0.CO;2
- LIMA, J. W. M.; COLLISCHONN, W.; MARENGO, J. A. (Ed.). Efeitos das Mudanças Climáticas na Geração de Energia Elétrica. São Paulo: AES Tietê. Hunter Books Editora, 2014. 360 p.

- LUCENA, A. F. P.; SZKLO, A. S.; SCHAEFFER, R.; SOUZA, R. R.; BORBA, B. S. M. C.; COSTA, I. V. L.; et al. The vulnerability of renewable energy to climate change in Brazil. *Energy Policy*, v. 37, p. 879–889. 2009.
- LUCENA, A. F. P.; SZKLO, A. S.; SHAEFFER, R.; DUTRA, R. M. The vulnerability of wind power to climate change in Brazil. *Renewable Energy*, v. 35, p. 904–912. 2010.
- LUCENA, A. F. P. Proposta Metodológica para Avaliação da Vulnerabilidade às Mudanças Climáticas Globais no Setor Hidroelétrico. Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Rio de Janeiro, 2010.
- LYRA, A. A. Estudo de vulnerabilidade do bioma Amazônia aos cenários de mudanças climáticas. Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015.
- LYRA, A. A.; TAVARES, P. S.; CHOU, S. C.; SUEIRO, G.; DEREZYNSKI, C.; SONDERMAN, M.; SILVA, A.; MARENGO, J.; GIAROLLA, A. 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*, p. 1-20, 2017. Doi: 10.1007/s00704-017-2067-z
- MAGRIN, G. O. et al. Central and South America in Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change (eds. Barros, VR et al.), p. 1499-1566, 2014.
- MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J. G.; ROGERS, A. L. Wind energy explained: theory, design and application. John Wiley & Sons, 2010.
- MANZATTO, C. V.; ASSAD, E. D.; BACCA, J. F. M.; ZARONI, M. J.; PEREIRA, S. E. M. (Org.). Zoneamento Agroclimático da Cana-de-Açúcar: Expandir a produção, preservar a vida, garantir o futuro. EMBRAPA. Rio de Janeiro, 2009.
- MARCOLINI, M. P. Efeito das Mudanças Climáticas no Zoneamento Agroclimático para Cultura do *Eucalyptus urograndis* no Estado do Tocantins.

- Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Tocantins. 95 pag. Palmas, 2014.
- MARENGO, J. A. Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI. Brasília: MMA, 2007. ISBN: 85-7738-038-6.
 - MARENGO, J. A. et al. Future change of climate in South America in the late twenty-first century: intercomparison of scenarios from three regional climate models. *Climate Dynamics*, v. 35, n. 6, p. 1073-1097, 2010.
 - MARENGO, J. A.; BERNASCONI, M. Regional differences in aridity/drought conditions over Northeast Brazil: present state and future projections. *Climatic Change*, v. 129, n. 1-2, p. 103-115, 2015. DOI: 10.1007/s10584-014-1310-1
 - MARENGO, J. A. O futuro clima do Brasil. *Revista USP*, n. 103, p. 25-32, 2014.
 - MARENGO, J.A.; ALVES, L.M.; BESERRA, E.A.; LACERDA, F.F. Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro. *Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas*. Campina Grande: Instituto Nacional do Semiárido, v. 1, p. 383-422, 2011a.
 - MARENGO, J. A. et al. Dangerous Climate Change. A Brazil-UK analysis of climate change and deforestation impacts in the Amazon. 55pp. 2011b.
 - MARENGO, J. A.; CHOU, S. C.; KAY, G.; ALVES, L. M.; PESQUERO, J. F.; SOARES, W. R.; SANTOS, D. C.; LYRA, A. A.; SUEIRO, G.; BETTS, R.; CHAGAS, D. J.; GOMES, J. L.; BUSTAMANTE, J. F.; TAVARES, P. S. Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTEC/HadCM3 climate change projections: climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Paraná River basins. *Climate Dynamics*, v. 38, n. 9-10, p. 1829-1848, 2012. DOI: 10.1007/s00382-011-1155-5
 - MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; TORRES, R. R.; CHOU, S. C.; LYRA, A. Bases para modelagem de mudanças climáticas. In: LIMA, J. W. M.; COLISCHONN,

- MARENGO, J. A. (Orgs.). Efeitos das mudanças climáticas na geração de energia elétrica. São Paulo: Hunter Books Editora, p. 23-63, 2014c.
- MARIN, F.; NASSIF, D.S.P.; Mudanças climáticas e a cana-de-açúcar no Brasil: fisiologia, conjuntura e cenário futuro. Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental, v. 17, n.2, p. 232-239, Campinha Grande, 2013.
 - MARIN, F. R.; et al. Climate change impacts on sugar cane attainable yield in southern Brazil. Climatic Change, v. 117, n. 227-239, 2013.
 - MARTIN, G. M.; et al. The HadGEM2 family of Met Office Unified Model climate configurations. Geoscientific Model Development, v.4, p. 723-757, 2011.
 - MACEIRA, M. P.; TERRY, L. A.; COSTA, F. S.; DAMÁZIO, J. M.,; MELO, A. C. G. Chain of optimization models for setting the energy dispatch and spot price in the Brazilian system. In: Proceedings of the Power System Computation Conference-PSCC, p. 24-28, 2002.
 - MCT. Segunda comunicação nacional do Brasil à convenção-Quadro das nações unidas sobre Mudança do clima. Mct, Brasília, DF, Brasil, v. 2, 2010.
 - MCTI. Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima – Volume II. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Brasília, 2016b.
 - MELLOR, G.L.; YAMADA, T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. Reviews of Geophysics, v. 20, n. 4, p. 851-875, 1982. Doi: 10.1029/RG020i004p00851
 - MESINGER, F. A blocking technique for representation of mountains in atmospheric models. Rivista di Meteorologia Aeronautica, v. 44, p. 195-202, 1984.
 - MESINGER, F.; CHOU, S. C.; GOMES, J. L.; JOVIC, D.; LYRA, A. A.; BUSTAMANTE, J. F.; BASTOS, P. R.; LAZIC, L.; MORELLI, S.; RISTIC, I. An upgraded version of the Eta model. Meteorology and Atmospheric Physics, v. 116, n. 3-4, p. 63-79, 2012. Doi:10.1007/s00703-012-0182-z
 - MESINGER, F.; JANJIC, Z. I.; NICKOVIC, S.; GAVRILOV, D.; DEAVEN, D. G. 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*, v. 116, n. 7, p. 1493-1518, 1988.
- MESINGER, F.; CHOU, S. C.; GOMES, J. L.; JOVIC, D.; BASTOS, P.; BUSTAMANTE, J. F.; LAZIC, L.; LYRA, A. A.; MORELLI, S.; RISTIC, I.; VELJOVIC, K. An upgraded version of the Eta Model. *Meteorology and Atmospheric Physics*, v. 116, p. 63-79, 2012.
 - MCT. Segunda comunicação nacional do Brasil à convenção-Quadro das nações unidas sobre Mudança do clima. Mct, Brasília, DF, Brasil, v. 2, 2010.
 - MCTI. Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima – Volume II. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Brasília, 2016.
 - MILLY, P. C. D; DUNNE, K. A.; VECCHIA, A. V. Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature*, v. 438, n. 7066, p. 347, 2005.
 - MIRANDA, R. F.; SZKLO, A.; SCHAEFFER, R. Technical-economic potential of PV systems on Brazilian rooftops. *Renewable Energy*, P. 694-713. 2014.
 - MMA. Plano Nacional de Adaptação. Ministério do Meio-Ambiente. Brasil. 2016a. <http://www.mma.gov.br/clima/adaptacao/plano-nacional-de-adaptacao>. Acesso em 01/08/2017.
 - MMA. Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima. Volume II: Estratégias Setoriais e Temáticas. Ministério do Meio Ambiente: Brasília, 2016b.
 - MME. Energia Solar no Brasil e Mundo. Departamento de Informações e Estudos Energéticos. Ministério de Minas e Energia Brasil. 2016.
 - MME/EPE. Plano Decenal de Expansão de Energia 2026 - PDE 2026. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília. 2017.
 - MOSS, R. H.; EDMONDS, J. A.; HIBBARD, K. A.; MANNING, M. R.; ROSE, S. K.; et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, v. 463, n. 11, p. 747-756, 2010.

- NAKICENOVIC, N.; ALCAMO, J.; GRUBLER et al. Special report on emissions scenarios (SRES), a special report of Working Group III of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, 2000.
- NETO, A. R.; PAZ, A. R.; MARENGO, J. A.; CHOU, S. C. Hydrological processes and climate change in hydrographic regions of Brazil. *Journal of Water Resource and Protection*, v. 8, n. 12, p. 1103, 2016.
- NEW, M.; HULME, M.; JONES, P. Representing Twentieth-Century Space-Time Climate Variability. Part I: Development of a 1961-1990 Mean Monthly Terrestrial Climatology. *Journal of Climate*, v. 12, p. 829-856, 1999.
- NOBRE, P.; SIQUEIRA, L. S. P.; ALMEIDA, R. A. F. de.; MALAGUTTI, M.; GIAROLLA, E.; CASTELÃO, G. P.; et al. Climate Simulation and Change in the Brazilian Climate Model. *Journal of Climate*, v. 26, p. 6716-6732, 2013.
- NÓBREGA, M. T.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.; PAZ, A. R. Uncertainty in climate change impacts on water resources in the Rio Grande Basin, Brazil *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* v. 7, p. 6099-6128, 2010.
- NUNES, D. S.; COLLICCHIO, E. Efeito das Mudanças Climáticas no Zoneamento Agroclimático do Eucalyptus urophylla no Estado do Tocantins. III Seminário Integrado de Ensino, Pesquisa, Extensão e Cultura. Universidade Federal do Tocantins. Palmas, 2016.
- OLIVEIRA, M. J.; CARNEIRO, C. D. R.; VECCHIA, F. A. S.; BAPTISTA, G. M. M. Ciclos climáticos e causas naturais das mudanças do clima. *Terra e Didática*, 2017.
- OLIVEIRA, J. L.; COSTA, A. A. Estudo de variabilidade do vento em escala sazonal sobre o nordeste brasileiro utilizando o RAMS; os casos de 1973-1974 e 1982-1983. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 26, n. 1, p. 95-108, 2011.
- OLIVEIRA, G. G. de.; PEDROLLO, O. C.; CASTRO, N. M. dos. R. As incertezas associadas às condições climáticas obtidas pelo modelo Eta CPTEC/HadCM3: Avaliação comparativa entre os dados simulados e observados de precipitação, evapotranspiração e vazão na bacia hidrográfica do Rio Ijuí, Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 30, n. 1, p. 101 - 121, jun. 2015.

- ONS. Boletim Mensal de Geração Eólica. Operador Nacional do Sistema Elétrico. 2017.
- OSCAR JUNIOR, A.; SILVA, W. L.; RUFFATO, V.; BARRETO, R.; FREITAS, M. Evaluation of Renewable Energy Vulnerability to Climate Change in Brazil: A Case Study of Biofuels and Solar Energy. *Smart Grid and Renewable Energy*, v. 6, n. 08, p. 221, 2015.
- PAULSON, C. A. The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer. *Journal of Applied Meteorology*, v. 9, n. 6, p. 857-861, 1970. doi: 10.1175/1520-0450(1970)009<0857:TMROWS>2.0.CO;2
- PEIXOTO, J. P.; OORT, A. H. *Physics of Climate*. American Institute of Physics, 520 p. 1992.
- PNUD- PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO. Online, 2011. Disponível em: <<http://pnud.cptec.inpe.br/>>. Acesso em: 13 ago. 2018.
- PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; PES, M. P.; da CRUZ SEGUNDO, E. I.; LYRA, A. A.; The impacts of global climate changes on the wind power density in Brazil. *Renewable Energy*, v. 49, p. 107-110. 2013.
- PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. J. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. Atlas brasileiro de energia solar. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 88p.: il. (E-BOOK). ISBN 978-85-17-00089-8
- PES, M. P. Impactos das variações e mudanças climáticas sobre os ventos extremos e seus efeitos no setor elétrico brasileiro. Tese de doutorado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. 2015.
- PES, M. P. ; PEREIRA, E. B. ; MARENGO, J. A.; MARTINS, F. R. ; HEINEMANN, D.; SCHMIDT, M. Climate trends on the extreme winds in Brazil . *Renewable Energy*, v. 109, p. 110-120. 2017.
- PESQUERO, J. F.; CHOU, S. C.; NOBRE, C.A.; MARENGO, J. A. Climate downscaling over South America for 1961–1970 using the Eta Model. *Theoretical and applied climatology*, v. 99, n. 1-2, p. 75-93, 2010. doi: 10.1007/s00704-009-0123-z

- PINTO, H. M. S. Projeções de risco de produção de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo baseadas em simulações multimodelos e cenários climáticos futuros. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. 127 p. Piracicaba, 2015.
- PIROVANI, D. B.; SILVA, L. G.; MORAES, W. B.; JESUS JÚNIOR, W. C.; CECILIO, R. A. Análise de risco do estabelecimento do cancro do eucalipto no Brasil face às mudanças climáticas globais. XVII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, Guarapari, 2011.
- PRECIS (Providing Regional Climates for Impacts Studies). The Hadley Centre regional climate modeling system. 2018. 1 p. Disponível em: <<https://www.climateurope.eu/precis/>>. Acesso em: 09 ago. 2018.
- PRESTON, D. W.; DIETZ, E. R. The Art of Experimental Physics. Ed: John Wiley & Sons. Nova York, 1991.
- QIAN, Y. et al. Uncertainty quantification in climate modeling and projection. Bulletin of the American Meteorological Society, v. 97, n. 5, p. 821-824, 2016.
- QUINTÃO, A. F.; BRITO, I.; OLIVEIRA, F.; MADUREIRA, A. P.; CONFALONIERI, U. Social, Environmental, and Health Vulnerability to Climate Change: The Case of the Municipalities of Minas Gerais, Brazil. Journal of environmental and public health, v. 2017, 2017.
- REBOITA, M. S. et al. Entendendo o Tempo e o Clima na América do Sul. Terræ didática, v. 8, n. 1, p. 34-50, 2012.
- REBOITA, M. S.; ROCHA, R. P.; DIAS, C. G.; YNOUE, R. Y. Climate projections for South America: RegCM3 driven by HadCM3 and ECHAM5. Advances in Meteorology, v. 2014, 2014. DOI: 10.1155/2014/376738.
- REBOITA, M. S.; AMARO, T. R.; SOUZA, M. R. Winds: intensity and power density simulated by RegCM4 over South America in present and future climate. Climate Dynamics, v. 51, n. 1-2, p. 187-205, 2018. DOI: 10.1007/s00382-017-3913-5
- REN21 - Renewables 2016 - Global Status Report. Disponível em http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/05/GSR_2016_Full_Report_lowres.pdf

- RIBEIRO, A. L. Energia Solar Fotovoltaica: Viabilidade no segmento residencial. (Dissertação) Pós Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Itajubá. Maio 2017. 98 p.
- RODRIGUEZ, D. A.; TOMASELLA, J.; LINHARES, C. Is the forest conversion to pasture affecting the hydrological response of Amazonian catchments? Signals in the Ji-Paraná Basin. *Hydrological Processes*, v. 24, p. 1254–1269. 2010.
- RUMMUKAINEN, M. State-of-the-art with regional climate models. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, v. 1, n. 1, p. 82-96, 2010. Doi:10.1002/wcc.8
- SAE. Brasil 2040: cenários e alternativas de adaptação à mudança do clima – Resumo Executivo. Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República Brasília, 2015.
- SAMPAIO, G.; DIAS, P. L. da S. Evolução dos modelos climáticos e de previsão de tempo e clima. *Revista USP*, São Paulo, n. 103, p. 41-54, 2014.
- SANTANA, T. B. Impacto de Mudanças Climáticas sobre o Regime de Vazões e a Geração Hidrelétrica de Energia. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia), Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI. Itajubá, 2013.
- SANTIAGO, G. A. C. F. Impactos de Cenários Climáticos Futuros na Aptidão Agroclimática da Cana-de-açúcar na Zona da Mata de Pernambuco. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energética e Nucleares. Universidade Federal de Pernambuco. 96 p. Recife, 2015.
- SCHAEFFER, R.; SZKLO, A. S.; LUCENA, A. F. P. de.; SOUZA, R. R. de.; BORBA, B. S. M. C.; COSTA, I. V. L. da.; PEREIRA JÚNIOR, A. O.; CUNHA, S. H. F. da. Mudanças climáticas e segurança energética no Brasil. Relatório do PPE/Coppe/UFRJ. Rio de Janeiro. Jun. 2008. 67 p. Disponível em: <http://mudancasclimaticas.cptec.inpe.br/~rmclima/pdfs/destaques/CLIMA_E_SEGURANCA-EnERGETICA_FINAL.pdf>. Acesso em: 08 ago. 2018.

- SCHAEFFER, R.; SZKLO, A. S.; LUCENA, A. F. P.; BORBA, B. S. M. C.; NOGUEIRA, L. P. P.; FLEMING, F. P.; TROCCOLI, A.; HARRISON, M. e BOULAHYA, M. S. Energy Sector Vulnerability to Climate Change: a review. *Energy*, v. 38, p. 1-12, 2012.
- SCHERNER, N.; MARANGON LIMA, J. W.; MARANGON LIMA, L. M.; QUEIROZ, A.R. Avaliação da complementaridade das usinas hidráulicas e eólicas frente às mudanças climáticas. The 12th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission – Clagtee. Mar del Plata, Argentina. 2017.
- SIGEL. Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico. Agência Nacional de Energia Elétrica- ANEEL. Disponível em: <<https://sigel.aneel.gov.br/Down/>>. Acesso em: 13 ago. 2018.
- SILVA, E. M. da.; CASTRO, M. A. H. de. Análise da climatologia de precipitação simulada em escala regional usando *downscaling* dinâmico sobre a região Norte do Nordeste do Brasil. *Revista Tecnologia*, Fortaleza, v. 26, n. 2, p. 124-133, dez. 2005.
- SILVA, L. T.; R., D. A., SILVA, J. M. B.; JUNIOR, J. L. S.; CORTE-REAL, J. A. M.; CAMARINHA, P. I. M. A Vulnerabilidade a Escorregamentos de terra da bacia do Rio Bengalas-Nova Friburgo-Brasil sob as projeções de Mudanças Climáticas do Eta-HadGEM-ES RCP 4.5. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 68, n. 9, 2016.
- SOLMAN, S. A.; PESSACG, N. L. Regional climate simulations over South America: sensitivity to model physics and to the treatment of lateral boundary conditions using the MM5 model. *Climate dynamics*, v. 38, n. 1-2, p. 281-300, 2012.
- SOLMAN, S. A. et al. Evaluation of an ensemble of regional climate model simulations over South America driven by the ERA-Interim reanalysis: model performance and uncertainties. *Climate Dynamics*, v. 41, n. 5-6, p. 1139-1157, 2013.
- TEOTÓNIO, C.; FORTES, P.; ROEBELING, P.; RODRIGUEZ, M.; ROBAINA-ALVES, M. Assessing the Impacts of Climate Change on Hydropower Generation and the Power Sector in Portugal: a partial equilibrium approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 74, p. 788-799, mar. 2017.

- TEUTSCHBEIN, C.; SEIBERT, J. I. Is bias correction of regional climate model (RCM) simulations possible for non-stationary conditions? *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, v.17, p. 5061–5077, 2013.
- TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T. Environmental Issues in the La Plata Basin. *Water Resources Development*. v. 14, n. 2, p. 157–173, 1998.
- UNICA. Área plantada com cana-de-açúcar, 2007-2016. União da Indústria de Cana-de-açúcar. 2018. Disponível em: < <http://www.unicadata.com.br/>>. Acesso em: 13 ag. 2018.
- VAN VUUREN, D. P.; EDMONDS, J.; KAINUMA, M.; RIAHI, K.; THOMSON, A.; HIBBARD, K.; HURTT, G. C.; KRAM, T.; KREY, V.; LAMARQUE, J.F.; MASUI, T.; MEINSHAUSEN, M.; NAKICENOVIC, N.; SMITH, S.J.; ROSE, S. K.; The representative concentration pathways: an overview. *Climatic change*, v. 109, n. 1-2, p. 5, 2011.
- VIOLA, M. R.; DE MELLO, C. R.; CHOU, S. C.; YANAGI, S. N.; GOMES, J. L. 2014. Assessing climate change impacts on Upper Grande River Basin hydrology, Southeast Brazil. *International Journal of Climatology*. DOI: 10.1002/joc.4038
- WATANABE, M.; SUZUKI, T.; O'ISHI, R.; KOMURO, Y.; WATANABE, S.; et al. Improved Climate Simulation by MIROC5: Mean States, Variability, and Climate Sensitivity. *Journal of Climate*, v. 23, p. 6312-6335, dez. 2010.
- WMO. Guidelines on Ensemble Prediction Systems and Forecasting. n. 1091, 2012. Disponível: <http://www.wmo.int/pages/prog/www/Documents/1091_en.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2018.